

3.4.1. «КОРОНАС-Ф»

Космическая программа «КОРОНАС», включающая в себя три спутника этой серии — спутник «КОРОНАС-И» (срок активного существования 1994–2001 гг.), спутник «КОРОНАС-Ф» (срок активного существования с 31 июля 2001 г. по 6 декабря 2005 г., высота орбиты 400–500 км, наклонение орбиты $\sim 83^\circ$, рис. 1, 2) и готовящийся к запуску спутник «КОРОНАС-Фотон», является составной частью долгосрочной научной программы по солнечно-земной физике, которая разработана и осуществляется Отделением физических наук, Советом по космосу и Научным Советом по солнечно-земной физике Российской академии наук в рамках Федеральной космической программы РФ под эгидой Федерального космического агентства.



Рис. 1. Спутник «КОРОНАС-Ф» на орбите

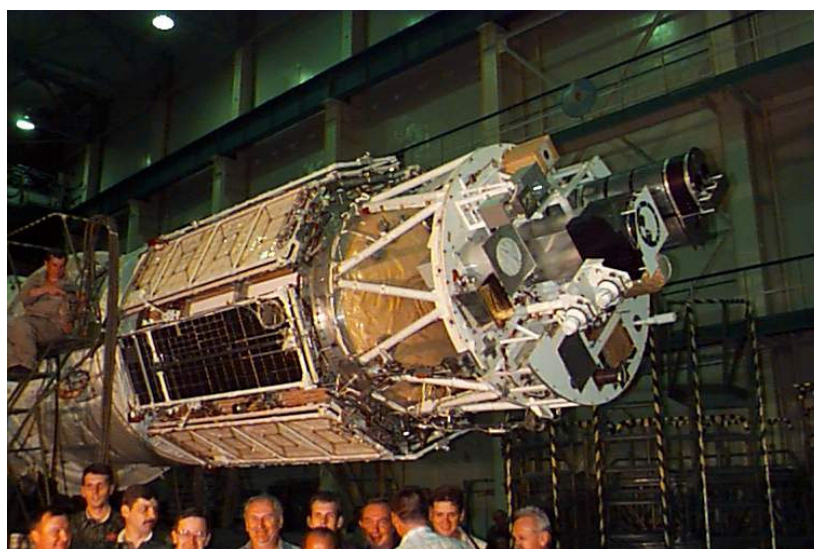


Рис. 2. Спутник «КОРОНАС-Ф», пристыкованный к ракете «Циклон».

КОРОНАС — аббревиатура названия «Комплексные ОРбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца».

Фазу роста текущего 23-го цикла солнечной активности исследовал спутник «КОРОНАС-И» (рис. 3), а сменивший его спутник «КОРОНАС-Ф» начал наблюдения в максимуме цикла и продолжал их до 6 декабря 2006 г., когда в результате естественной эволюции орбиты он прекратил свое существование.



Рис. 3. Наблюдения Солнца в текущем 23-м цикле солнечной активности спутниками «КОРОНАС-И, Ф»

Научные приборы спутника «КОРОНАС-Ф» и их измерительные диапазоны

Научный комплекс спутника «КОРОНАС-Ф» (рис. 4) включал 15 приборов, так что спутник представлял собой солнечную космическую обсерваторию, которая работала в автономном режиме и управлялась с Земли. Управление комплексом научной аппаратуры спутника осуществлял ЦУП ИЗМИРАН. Приборы спутника наблюдали Солнце во всем диапазоне электромагнитного спектра — от оптического до гамма (табл. 1), что позволяет на основе полученных данных проводить комплексный анализ явлений на Солнце и солнечно-земных связей.



Рис. 4. Научные приборы спутника «КОРОНАС-Ф»

Гелиосейсмологические наблюдения. Эксперимент ДИФОС

Непрерывные гелиосейсмологические наблюдения на спутнике КОРОНАС-Ф многоканальным спектрофотометром ДИФОС были начаты с 15 августа 2001 г. Прибор регистрировал низкие ($l = 0, 1, 2$) собственные моды глобальных колебаний Солнца (колебания акустического типа, называемые p -модами, период которых около 5 мин.) в широком диапазоне длин волн (350...1500 нм), измеряя очень малые изменения (10^{-5} ... 10^{-6} от общего потока Солнца) потока солнечного излучения, связанные с этими колебаниями. Важным результатом этих наблюдений было установление принципиальной возможности гелиосейсмологических исследований по наблюдениям с околоземных ИСЗ. Разработанные методики заполнения пропуска данных в наблюдениях, возникающего из-за захода спутника в тень, вычитания отраженного от земной атмосферы света, попадающего в детектор спектрофотометра, полученные результаты и их сравнение с другими данными и теоретическим результатами позволили сделать такое заключение. На рис. 5 показан спектр мощности p -мод глобальных колебаний Солнца. Каждому пику на спектре соответствует гармоническое глобальное колебание (p -мода) с определенным периодом, и значением чисел l и n (число узлов колебания по азимуту и радиусу Солнца, соответственно). В каждый момент времени одновременно регистрируется от 10 до 15 отдельных гармоник. Такие гармоники возбуждаются случайным образом в определенный момент времени, живут в течение нескольких дней или недель, затем исчезают, на смену им возбуждаются другие гармоники, с другими периодами.

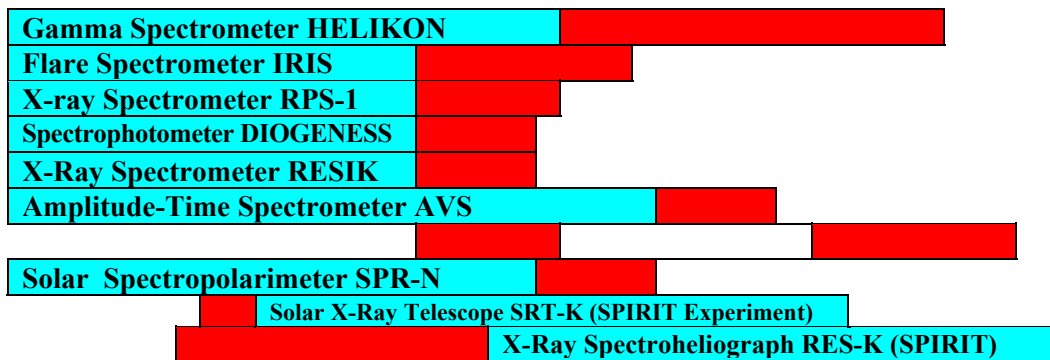
Таблица 1. Научные приборы спутника «КОРОНАС-Ф» и их измерительные диапазоны

Measuring channels of the CORONAS-F instruments

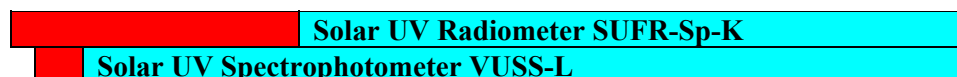
Helioseismology

Spectrophotometer DIFOS

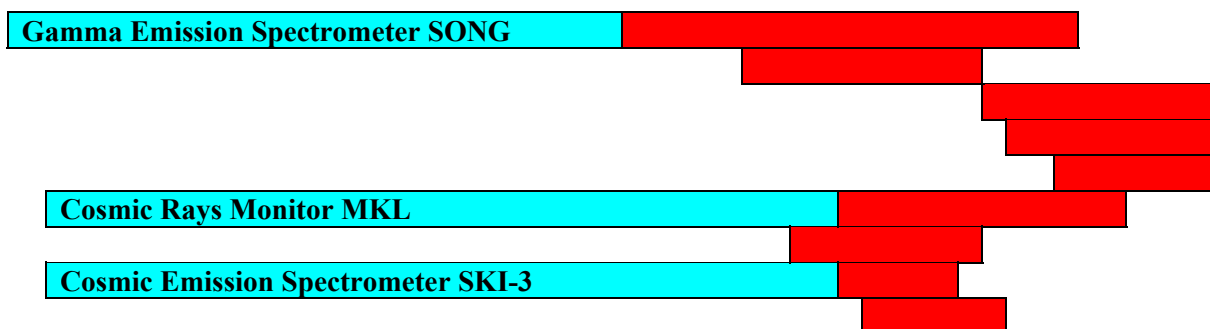
Solar Flares and Imaging of the Sun



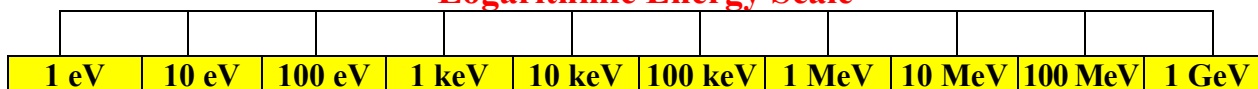
Ultra Violet Emission of the Sun



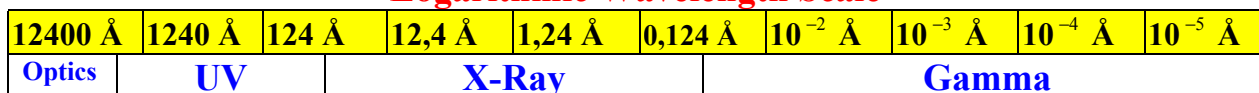
Solar Cosmic Rays



Logarithmic Energy Scale



Logarithmic Wavelength Scale



Integral covering of the energy and wavelength scale



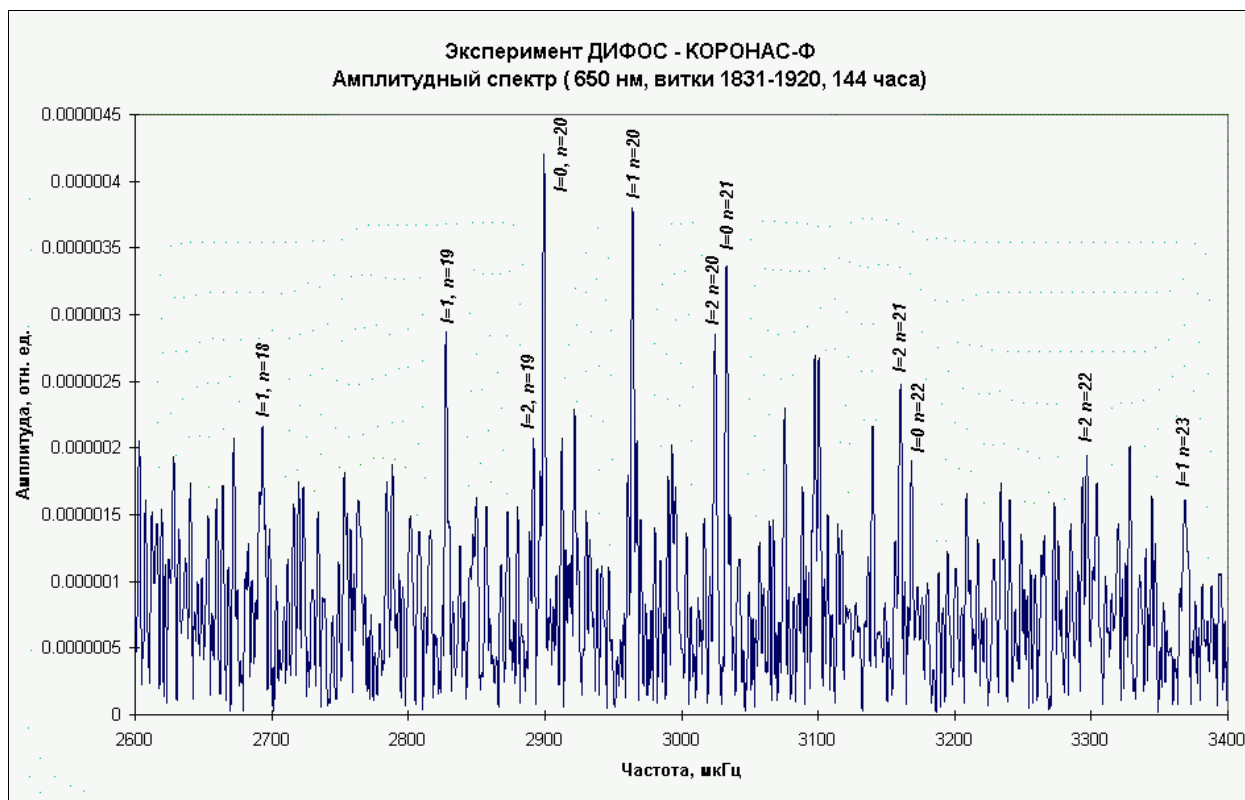


Рис. 5. Спектр мощности глобальных колебаний Солнца. Эксперимент ДИФОС

По данным прибора ДИФОС на основе метода с использованием аналитического сигнала проведен амплитудно-частотно-фазовый анализ глобальных колебаний, в частности, определены мгновенная частота, амплитуда и фаза отдельных p -мод колебаний на разных уровнях фотосферы, и показано, что уширение спектральных линий p -мод колебаний происходит в основном за счет флуктуаций амплитуды колебаний, в то время как стабильность частоты колебаний оказалась весьма высокой $\sim 10^{-4}$. Это соответствует значению уширения спектральных линий не более 0,4 мГц или характерным временам изменения частоты порядка месяца. Многоканальность спектрофотометра ДИФОС (каналы 350, 500, 650, 850, 1100, 1500 нм), существенно отличающая этот прибор от других космических экспериментов по наблюдению флуктуаций яркости Солнца, позволила выполнить исследование сдвигов фаз между колебаниями, наблюдаемыми в различных оптических каналах прибора ДИФОС (рис. 6, 7) и обнаружить неизвестный до сих пор эффект, состоящий в том, что колебания из верхних и глубоких слоев фотосферы бегут в сторону средних слоев фотосферы. Этот факт, что колебания из верхних слоев фотосферы бегут вниз, в то время как источник генерации колебаний находится под фотосферой в конвективной зоне Солнца находит объяснение в рамках теории неадиабатических колебаний, которая должна применяться к колебаниям в фотосфере, и который не может быть объяснен в рамках теории адиабатических колебаний, обычно применяемой в гелиосейсмологии. Сбегание волн к средним слоям фотосферы возникает из-за того, что именно там имеет место

наибольшее затухание колебаний из-за неадиабатичности по причине того, что эффективность лучистого теплообмена там наибольшая, а время релаксации температурных флуктуаций из-за радиационного теплообмена наименьшее. Таким образом, в средних слоях есть сток энергии, которую несут волны бегущие к этому месту как сверху, так и снизу. Этот впервые обнаруженный эффект является непосредственным доказательством неадиабатичности эванесцентных (*evanescent* — убывающий) p -мод колебаний в фотосфере. Это свойство колебаний могло быть установлено только на основе данных эксперимента ДИФОС, так как это единственный гелиосейсмологический эксперимент, который позволяет одновременно наблюдать собственные колебания Солнца в различных частях непрерывного спектра, уровни образования которых перекрывают по толщине всю фотосферу от температурного минимума до самых глубоких слоев, в которых возникает излучение на частотах порядка 1500 нм.

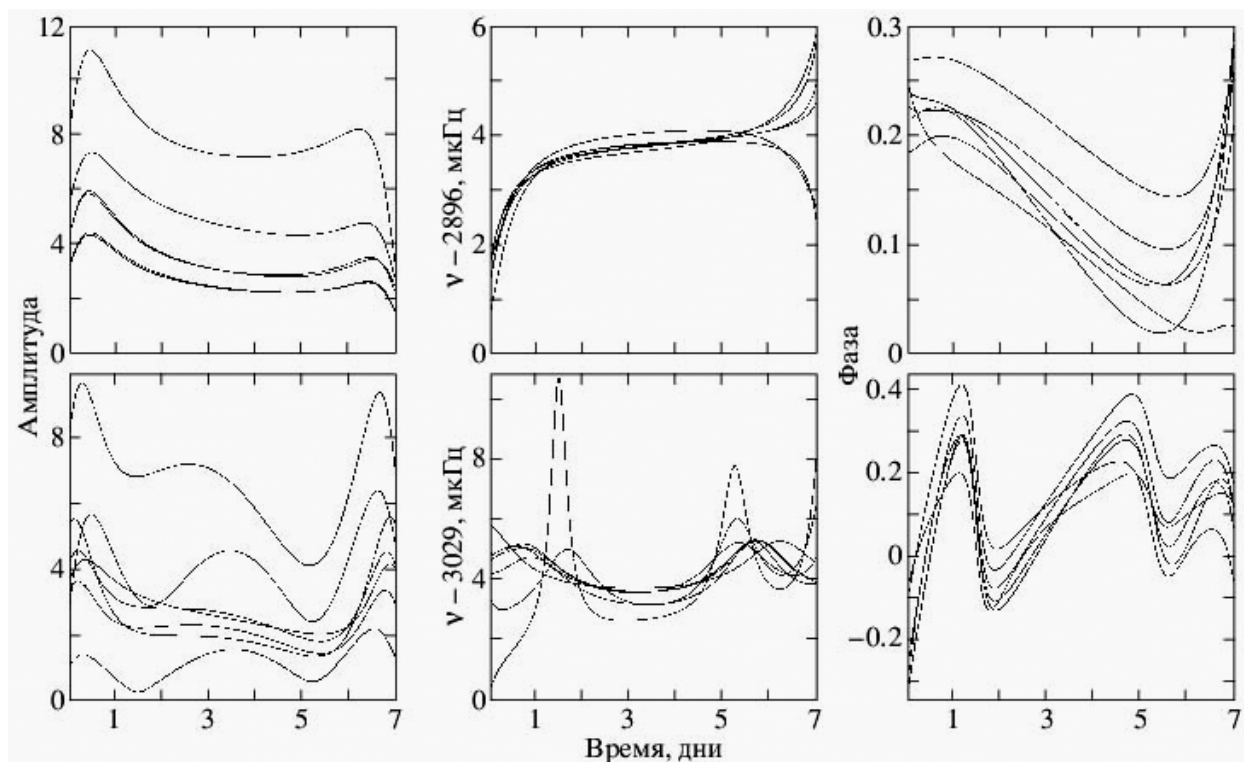


Рис. 6. Мгновенная амплитуда (в единицах 10^{-5} от среднего потока Солнца в соответствующем канале спектрофотометра), превышение мгновенной частоты (мкГц) над 2896 и 3029, а также сдвиги фаз (радианы) оптических каналов 350, 500, 650 и 850 нм по отношению к каналу 1500 нм. Верхний ряд графиков построен для моды $l = 0, n = 20$, а нижний ряд для $l = 0, n = 21$

На примере моды колебаний с $l = 0, n = 21$ с помощью метода аналитического сигнала проведено разделение измеряемых сигналов с близкими частотами и надежно установлено, что в сигнале этой моды наряду с основной гармоникой присутствует вторая гармоника с амплитудой втрое меньшей амплитуды основной гармоники и частотой, отличающейся всего на 2,3 мкГц. На рис. 8 асимметрия спектра колебаний возникает именно из-за

присутствия второй гармоники, а не связана с асимметричным спектром самой моды $n = 21$. На рис. 9 показаны результаты разделения гармоник моды $n = 21$ для всех оптических каналов прибора ДИФОС. На рис. 9а квадратами показаны частоты моды $n = 21$ после разделения гармоник. Для сравнения на этом же графике крестиками показаны частоты моды $n = 21$, определенные до разделения гармоник как посредством усреднения мгновенной частоты, так и посредством усреднения по спектру. Частоты паразитной гармоники, показанные перечеркнутыми квадратами, оказались в среднем меньше частоты моды $n = 21$ на 3 мкГц. Относительная амплитуда паразитной гармоники возрастает от 0,3 до 0,7 при переходе от канала 350 нм к каналу 1500 нм (см. рис. 9б), что соответствует переходу от верхних слоев к самым глубоким слоям фотосферы.

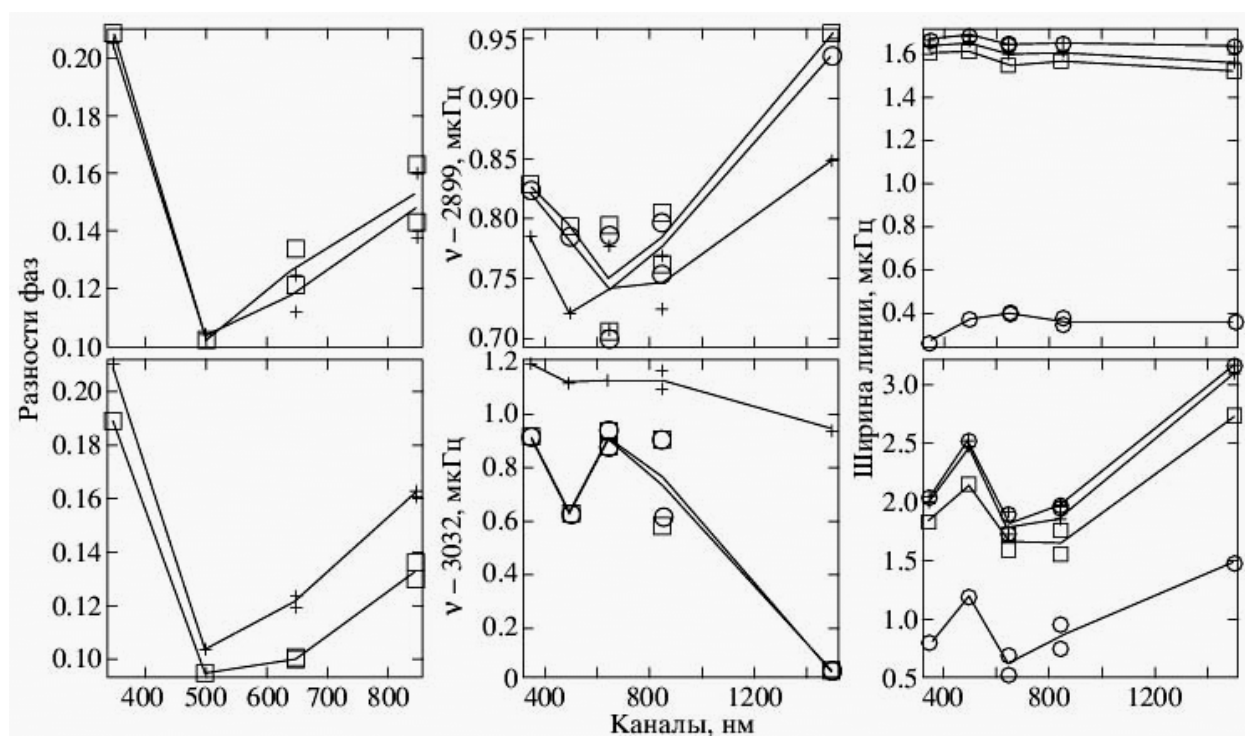


Рис. 7. Усредненные параметры мод $n = 20$ (верхний ряд) и $n = 21$ (нижний ряд). В левом столбце приведены разности фаз между колебаниями в каналах 350, 500, 650, 850 нм и каналом 1500 нм. Квадратами показаны разности усредненных по времени мгновенных фаз $\Phi(t)$. Крестиками показаны разности фаз в максимумах непрерывных спектров соответствующих каналов. В среднем столбце приведены средняя мгновенная частота $\langle \omega(t) \rangle$ (квадраты), частота $\langle \omega \rangle$, усредненная по спектру (крестики). Кружками показаны частоты максимумов непрерывных спектров соответствующих каналов. В правом столбце приведены полные ширины линий, определенные непосредственно по спектру (кружки) и с помощью аналитического сигнала (крестики), а также вклад в полную ширину линии за счет амплитудной (квадраты) и частотной (крестики в кружках) модуляций

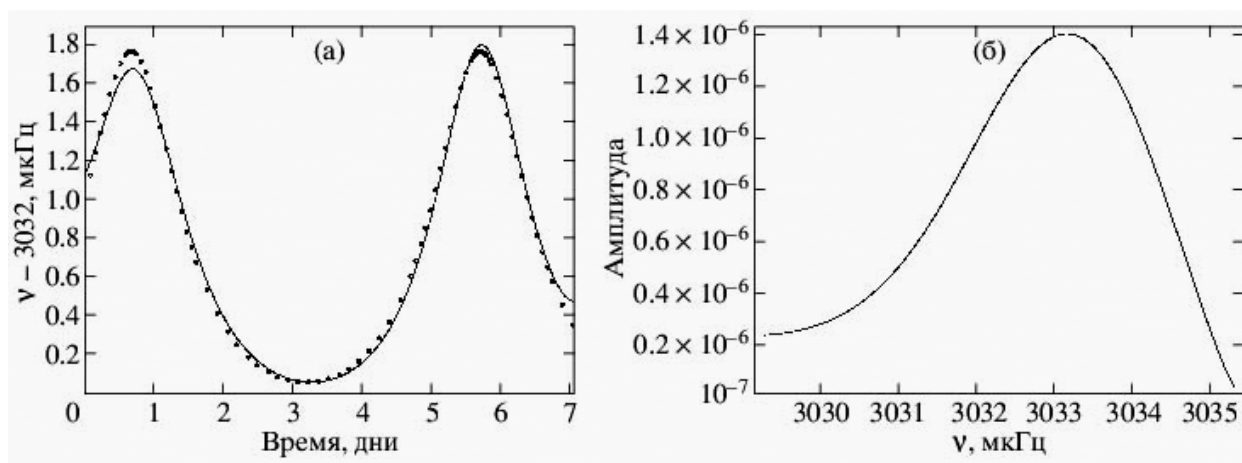


Рис. 8. Для моды $n = 21$ по измерениям в канале 850 нм (а) показана зависимость мгновенной частоты от времени (сплошная линия) и (б) спектр моды, демонстрирующий высокую чувствительность мгновенной частоты к наличию слабой дополнительной компоненты сигнала. Точечной линией на рис. (а) показана мгновенная расчетная частота

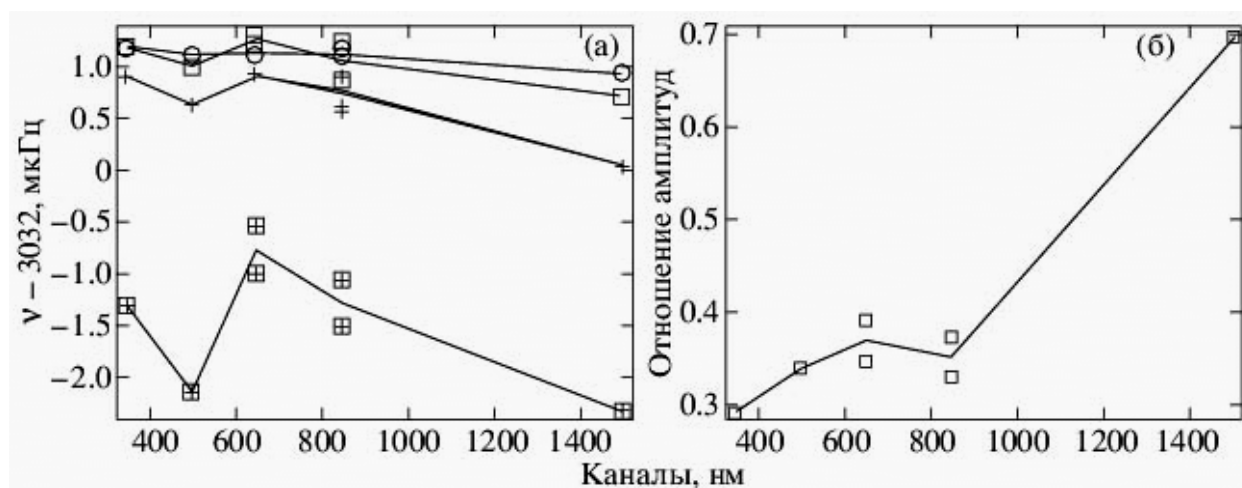


Рис. 9. Показаны результаты разделения гармоник моды $n = 21$ для всех оптических каналов прибора ДИФОС. На рис. а квадратами показаны частоты моды $n = 21$ после разделения гармоник, крестиками показаны средние частоты $\langle\omega(t)\rangle$ (мгновенная) и $\langle\omega\rangle$ (усредненная по спектру) до разделения гармоник. Квадратами и крестиками в квадратах показаны высокочастотная и низкочастотная гармоники двухкомпонентного сигнала.

Кружками показаны частоты, соответствующие максимуму непрерывных спектров колебаний в каждом из каналов прибора ДИФОС. На рис. (б) показано отношение амплитуды паразитной гармоники к амплитуде моды $n = 21$

Рентгеновские изображения Солнца

Изображения Солнца в различных спектральных линиях, отвечающих разным температурным слоям солнечной атмосферы, полученные солнечным рентгеновским телескопом с высоким пространственным разрешением (эксперимент СПИРИТ), позволили осуществить локализацию и изучить морфологию многочисленных активных явлений на Солнце. На рис. 10 показано состояние солнечной активности в период октября-ноября 2003 г., когда на Солнце наблюдался необычайно высокий за последние несколько десятилетий уровень солнечной активности. Целая серия вспышек была

рекордной по мощности, они сопровождались мощными выбросами со скоростями до 2000 км/с. Все они были зарегистрированы спутником «КОРОНАС-Ф». Солнце было покрыто активными областями и многочисленными магнитными петлями, сильно разогретыми областями.

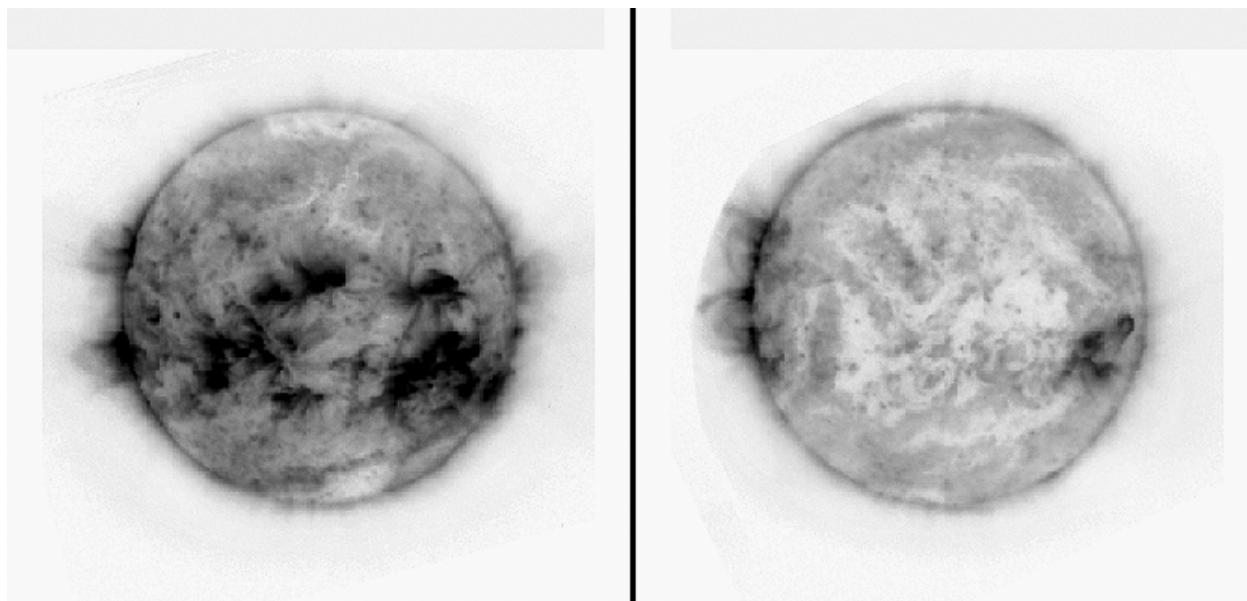


Рис. 10. Состояние поверхности Солнца в период октябрь–ноябрь 2003 г., когда на Солнце произошли наиболее мощные за последние несколько десятилетий активные явления.

Видна долготная (полусферная) асимметрия расположения активных областей по поверхности Солнца (см. также видеофильм)

Причиной мощнейших вспышек и выбросов в этот период, по-видимому, была глобальная долготная (практически полусферная) асимметрия расположения активных областей на поверхности Солнца. На приведенных изображениях Солнца (см. рис. 10), полученных через пол оборота Солнца видно, что на одной полусфере практически отсутствуют активные области, в то время как на другой полусфере их было около 30. Большие градиенты магнитного поля и обусловили столь мощные события, которые вызвали сильные магнитные бури на Земле и повышенные потоки космических лучей в околоземном космическом пространстве.

По рентгеновским наблюдениям изучена глобальная морфологию активности Солнца в период октябрь–ноябрь 2003 г., так называемые «димминги» (потемнения) (рис. 11), которые формировались в результате полного или частичного открытия первоначально закрытых магнитных полей в ходе корональных выбросов массы, и связанных с этим понижением меры эмиссии. При этом наблюдалась повторяемость выбросов из одних и тех же магнитных конфигураций, которые успевали восстановить свое магнитное поле и светимость за время между событиями.

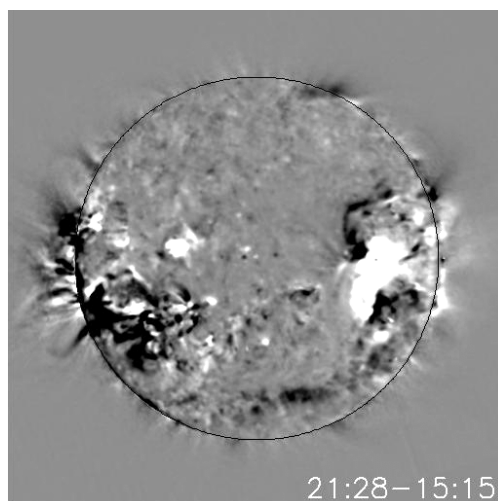


Рис. 11. Мощные вспышки и выбросы на Солнце 26 октября 2003 г., длина волны 175 Å (см. также видеофильм)

На основе наблюдений спектрогелиографом РЕС-К в резонансной линии MgXII (8,42 Å) в солнечной короне обнаружен и исследован целый класс новых явлений — быстродинамических плазменных образований с температурами до 20 млн градусов, тогда как температура самой солнечной короны составляет 1...2 млн град. Изображения и динамика этих высокотемпературных образований получены впервые. Они формируются, по-видимому, когда возникающая во время солнечных вспышек горячая плазма заполняет магнитную конфигурацию в короне, а излучение этой горячей плазмы очерчивает ее, в результате чего, образования имеют самую разнообразную форму (рис. 12) — в виде «горячих облаков», «пауков», петель, распространяющихся волновых фронтов, последовательно зажигающихся магнитных арок. Этот класс явлений открыл нам один из механизмов нагрева солнечной короны в результате выделения магнитной энергии в магнитных конфигурациях и трансформации ее в энергию плазмы. Установлено, что с обнаруженными горячими плазменными образованиями в короне часто связаны выбросы массы из атмосферы Солнца, которые наблюдаются коронографом на европейском спутнике SOHO.

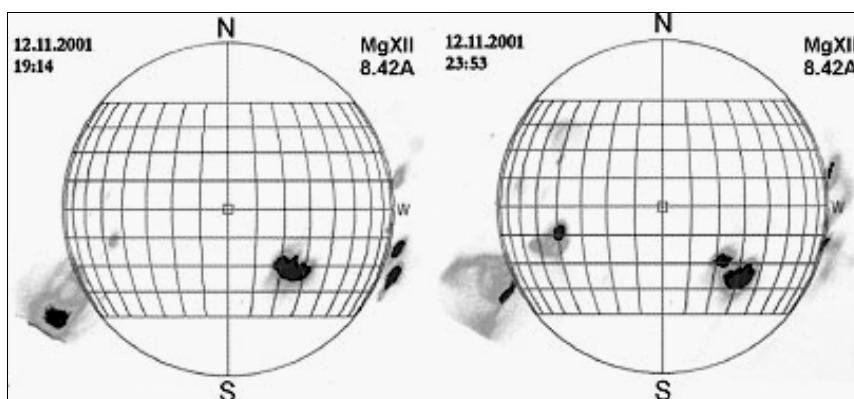


Рис. 12. Изображения горячих (до 20 млн град.) плазменных образований в солнечной короне по наблюдениям в линии MgXII (8,42 Å).

Наблюдения рентгеновским телескопом в режиме коронографа впервые позволили получить данные о динамике солнечной короны на расстояниях до трех солнечных радиусов (рис. 13), в области, важной для понимания природы многих явлений, но которая не наблюдается другими приборами — она является промежуточной между окололимбовой областью, наблюдаемой телескопами и дальней короной, наблюдаемой в белом свете коронографами. В этой области короны хорошо выделяются петли и арки магнитного поля, протяженные стримеры и струи истекающего солнечного ветра, а выбросы массы и эруптивные протуберанцы на этих высотах наблюдались впервые.

Рентгеновским коронографом получены также впервые карты распределения жесткого ультрафиолетового излучения для спокойной и возмущенной короны в присутствии на лимбе ярких активных областей, которые наглядно иллюстрируют магнитный нагрев короны над активными областями (рис. 14).

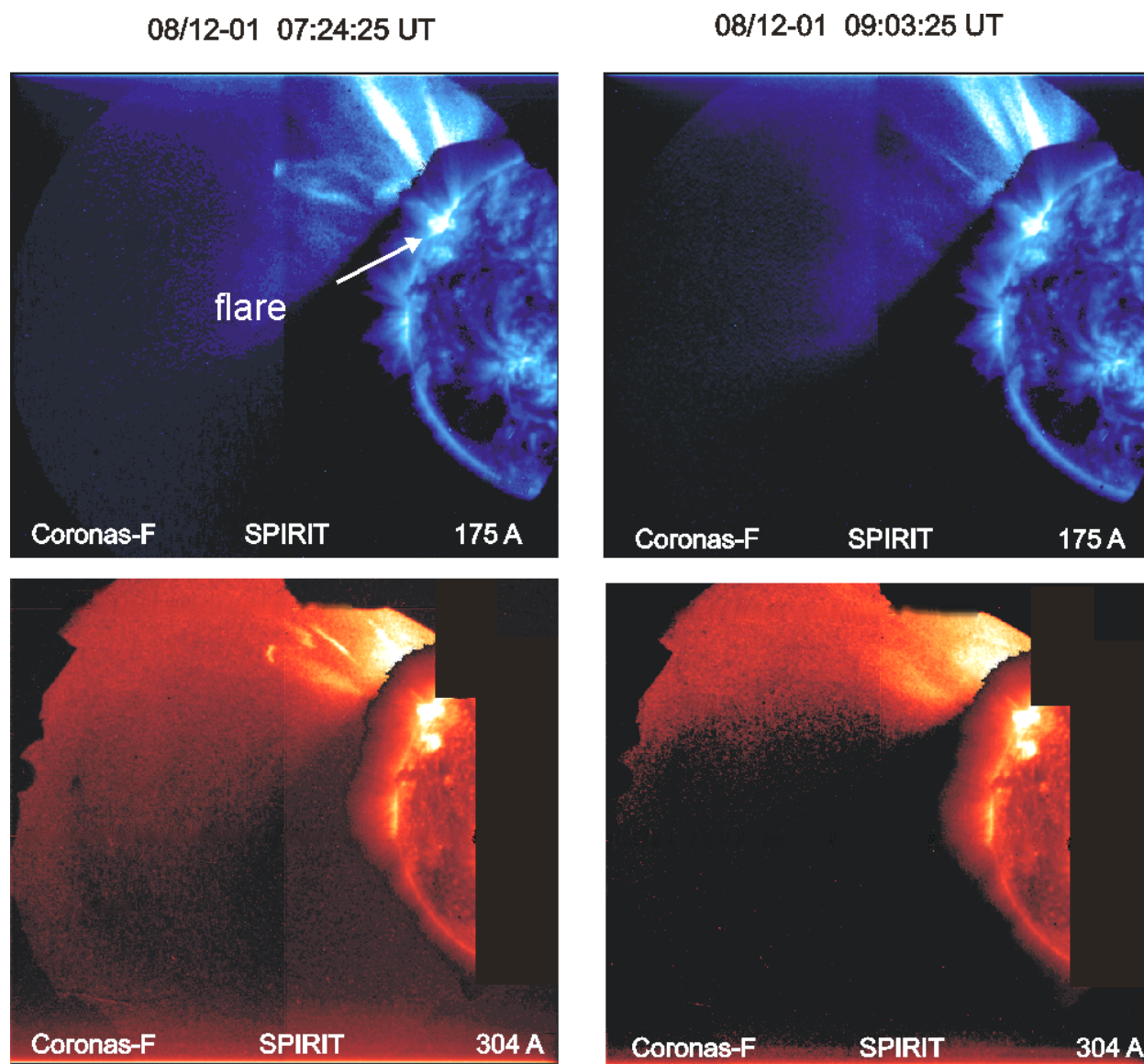


Рис. 13. Структура рентгеновской короны на расстояниях до трех солнечных радиусов

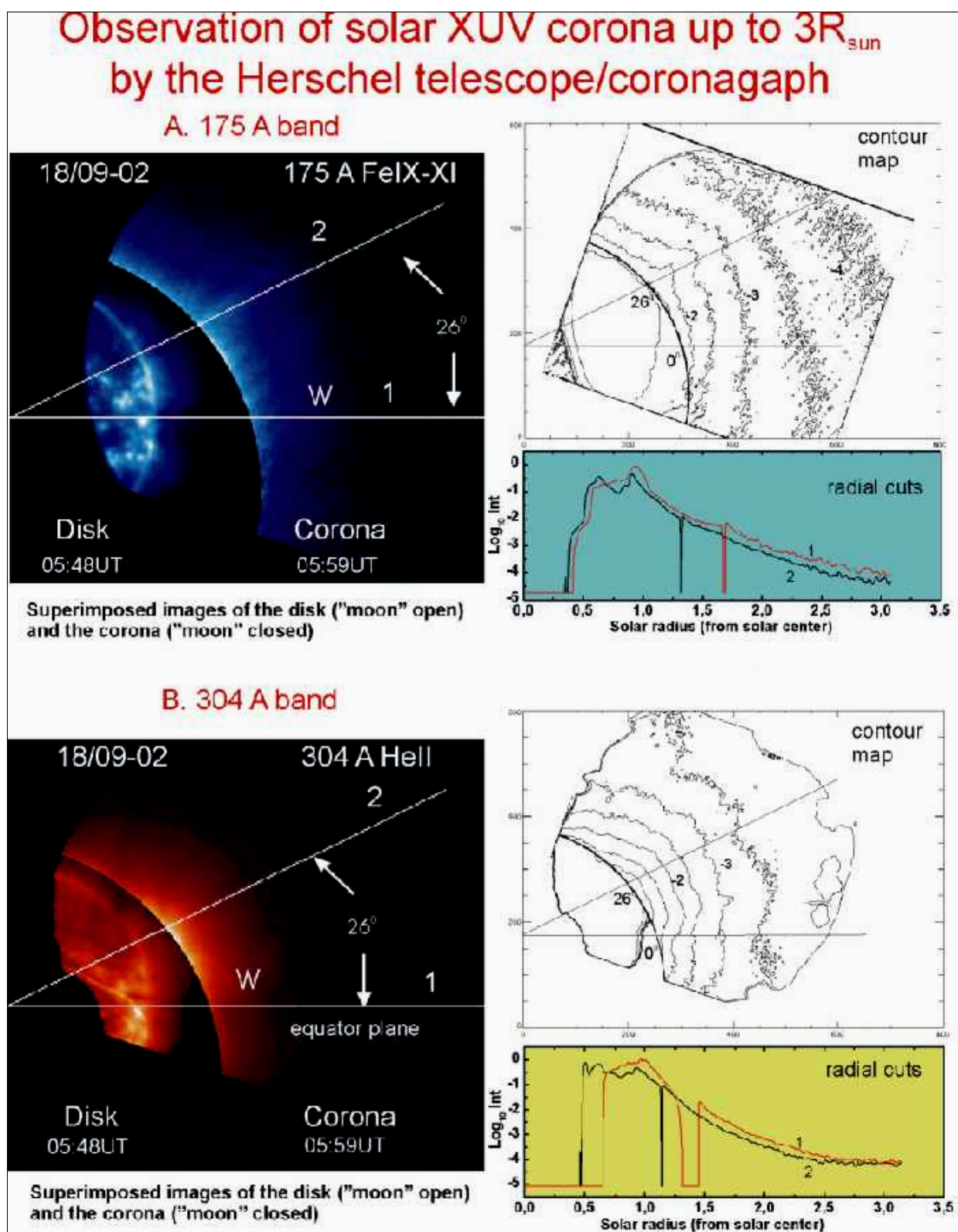


Рис. 14. Карты распределения жесткого ультрафиолетового излучения для спокойной и возмущенной короны в присутствии на лимбе ярких активных областей

События сентября 2005 г. В течение 2005 г. на фазе, близкой к минимуму текущего 23-го цикла солнечной активности, наибольший интерес вызвали наблюдения в период с 6 по 17 сентября 2005 года, когда на Солнце произошла серия экстремальных событий: 10 рентгеновских вспышек

класса X и 27 вспышек класса M, сопровождавшихся мощными выбросами коронального вещества и сильными геомагнитными бурями. Аппаратурой СПИРИТ/КОРОНАС-Ф были зарегистрированы в этот период 13 вспышек. Анализ изображений в корональных линиях в диапазоне 175 \AA с температурой около 1.2 МК показал, что во время всех вспышечных событий происходила сильная перестройка магнитных силовых линий в области вспышки (рис. 15). Мощная (третья по мощности в текущем цикле солнечной активности) лимбовая вспышка 07 сентября 2005 г. сопровождалась выбросом коронального вещества со скоростью около 550 км/с. В результате этих выбросов на изображениях Солнца в диапазоне 175 \AA образовывались глубокие «димминги» — временные понижения яркости, связанные с эвакуацией вещества во время выброса. 07 сентября после экстремально сильной вспышки X17 в 17:40 UT и сопутствующего коронального выброса понижение интенсивности излучения в линии 175 \AA в области «димминга» составило около 7 % от общей яркости Солнца. 13 сентября после вспышек X1.5 19:27 UT и X1.7 23:22 UT яркость в области «димминга» понизилась примерно на 5 %. Одновременные наблюдения солнечной короны спектрогелиометром аппаратуры СПИРИТ/КОРОНАС-Ф в диапазонах $177...210$ и $280...335 \text{ \AA}$, позволили получить линейчатые спектры, соответствующие предвспышечной и максимальной фазам развития вспышки, и установить появление множества «горячих» линий и общее возрастание интенсивности линий в максимальной фазе вспышки. По отношению интенсивностей линий излучения в зарегистрированных спектрах для лимбовой вспышки балла X17 07 сентября 2005 г. определена дифференциальная мера эмиссии, температурная зависимость которой позволила установить, что максимум светимости вспышечной плазмы приходился на температурный диапазон вблизи 10 МК.

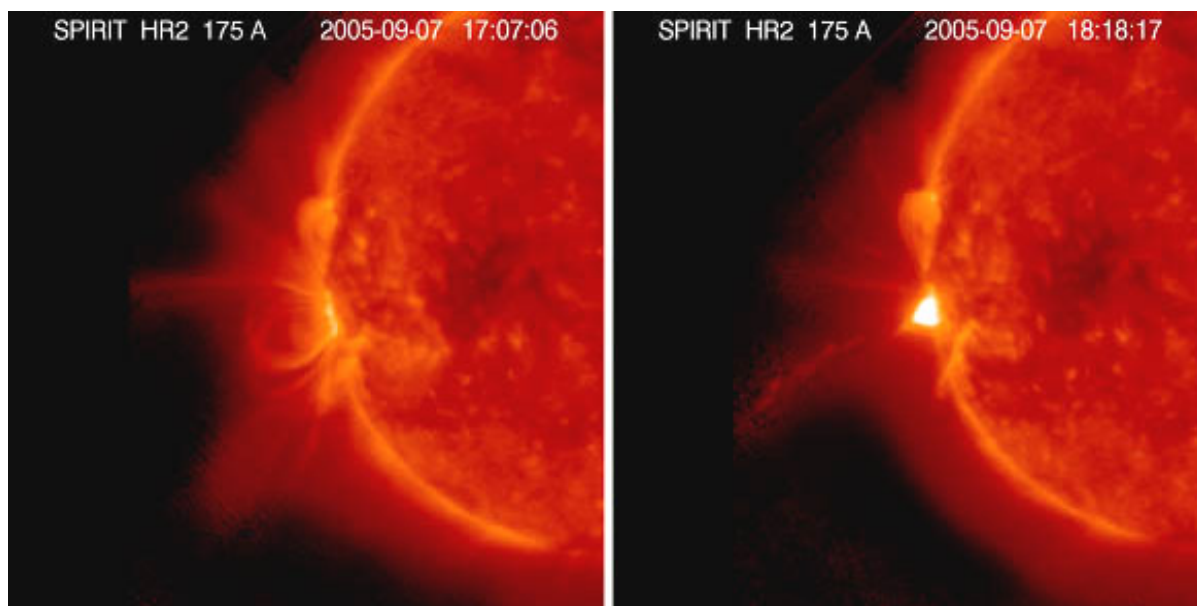


Рис. 15. Структура солнечной короны на лимбе в предвспышечном состоянии (слева) и в фазе максимума (справа) вспышки балла X17 07 сентября 2005 г. (см. также видеофильм)

Солнечные вспышки

За время наблюдений приборами спутника КОРОНАС-Ф с высоким временным и спектральным разрешением в широком энергетическом диапазоне (от оптического до гамма) получено огромное количество новой информации о различных физических процессах во вспышках. Это спектральные, энергетические, поляризационные и динамические характеристики вспышечных излучений, спектры ускоренных частиц, гамма линии и т. д. (рис. 16).

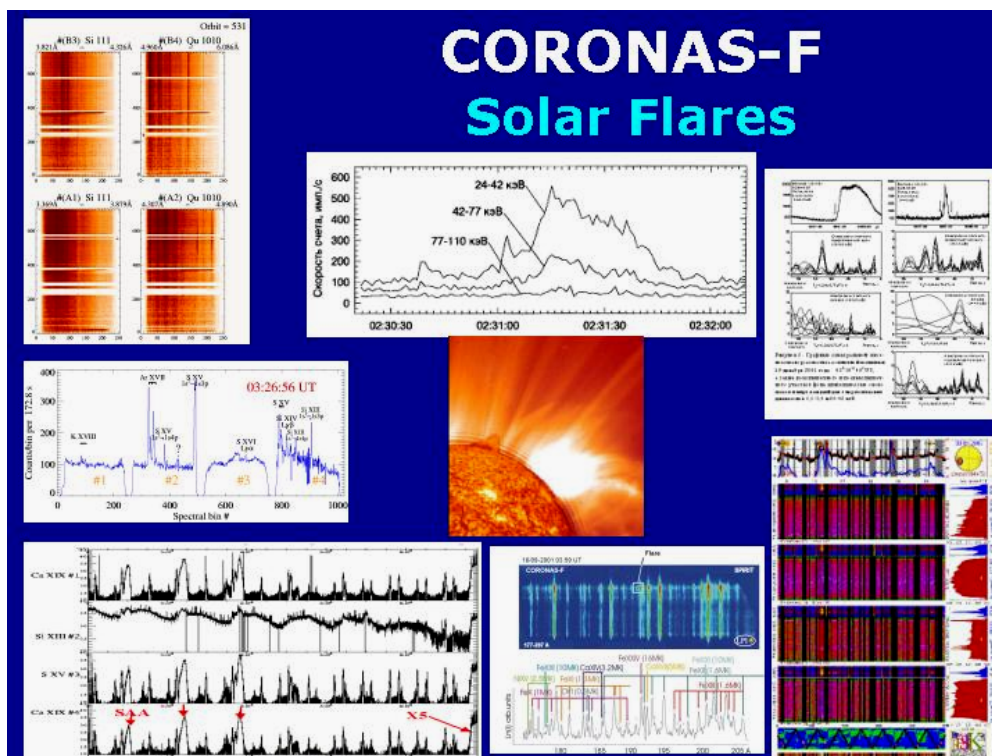
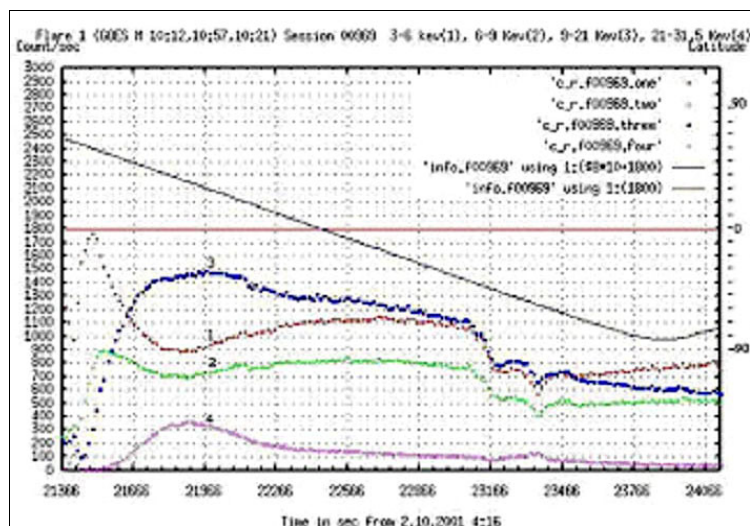
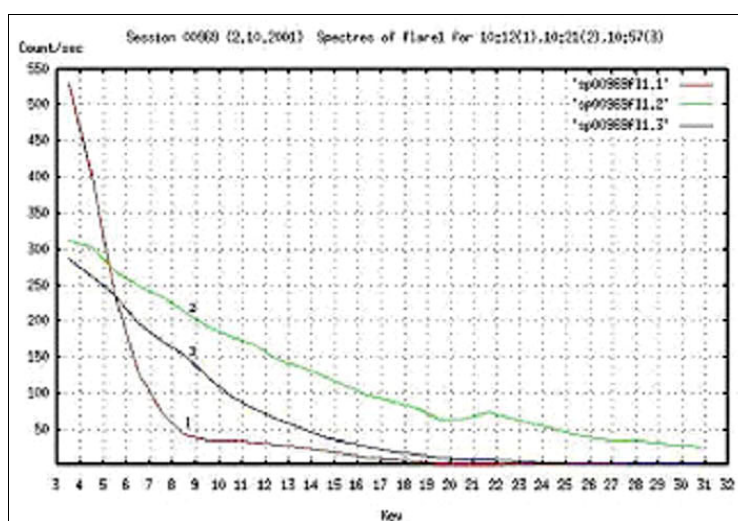


Рис. 16. Спектральные, энергетические и динамические характеристики вспышечных излучений, полученные приборами спутника «КОРОНАС-Ф»

Магнитный нагрев короны. С помощью высокочувствительного рентгеновского спектрометра РПС-1 в диапазоне 3...30 кэВ наблюдались предвспышечные возрастания и слабые вспышки — рентгеновских классов С и М. На рис. 17 показаны временные профили интенсивности и спектры рентгеновского излучения вспышки класса М на разных фазах: фаза роста, максимума и фаза спада. Наиболее жесткий спектр излучения этой вспышки достигался в фазе максимума вспышки. Рисунок 18 по данным октября 2003 г., когда происходили сильные изменения уровня солнечной активности, показывает зависимость спектра рентгеновского фона от уровня солнечной активности в отсутствие вспышек. Эта зависимость иллюстрирует магнитный нагрев солнечной короны — чем больше солнечных пятен, тем жестче спектр рентгеновского фона. В минимуме числа солнечных пятен спектр мягкий и обрывается при энергиях 6...7 кэВ. В максимуме — спектр жестче и доходит до 20 кэВ, что вызвано увеличением числа солнечных пятен и магнитным нагревом короны от активных областей (AR 484 и AR 486).



(a)



(б)

Рис. 17. Временные профили интенсивности (а) и спектры вспышки класса М (б) (2 ноября 2001 г.) на разных фазах: фаза роста, максимума и фазы спада

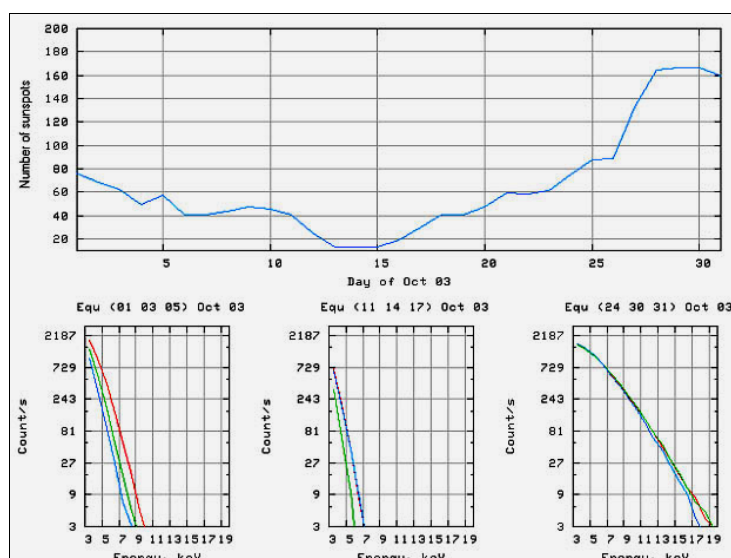


Рис. 18. Зависимость спектра рентгеновского фона от уровня солнечной активности в отсутствие вспышек, иллюстрирующая магнитный нагрев короны

Вспышечное рентгеновское излучение

На основе математической обработки полученных в течение 2005 г. и ранее временных профилей интенсивности излучения от слабых вспышек установлено наличие в профилях интенсивности мягкого и жёсткого рентгеновского излучения (3...40 кэВ) сложных временных структур с импульсами длительностью ~3...5 с, которые проявляются на фоне импульсов длительностью около 10 с. В энергетическом диапазоне ~100...150 кэВ обнаружены вариации потока рентгеновского излучения с характерными временами ~20 с. Изучено изменение временной структуры интенсивности излучения с фазой вспышки, которое показало, что на предвспышечной фазе присутствует мощный квазипериодический компонент с периодом около 20 с и нескольких более слабых компонентов с периодами от 4 до 12 с, а на послевспышечной фазе почти все компоненты расщепляются на две и более составляющих и большая часть энергии излучения сосредотачивается в области малых периодов. Физическая интерпретация этих экспериментальных данных связывается с рассмотрением существующих в солнечной атмосфере сложных магнитных структур (петель, аркад вспышечных петель) как системы связанных осцилляторов, которые в процессе развития вспышечного процесса могут изменять свою частоту, амплитуду колебаний, разрушаться и вновь возникать, а также с происходящим обменом энергии между вспышечными петлями. Секундные осцилляции интенсивности излучения могут быть объяснены «бегущими» по магнитной петле МГД-волнами, которые возникают от возмущения в одном из концов петли. Для характерных параметров плазмы солнечной короны численные оценки периодов колебаний магнитных петель во время вспышки дают значения в пределах от 2,2 до 66 с. Прогностическое значение полученных результатов состоит в возможности раннего распознавание развития вспышечного процесса по характеристикам рентгеновского излучения.

Изучение динамики энергетических спектров жесткого рентгеновского излучения на различных фазах развития вспышек с временным разрешением 1 с показало, что для некоторых вспышек спектр с большой точностью описывается степенной зависимостью на всех фазах развития вспышки, при этом показатель спектра изменяется во времени. В максимуме интенсивности излучения показатель спектра уменьшался и возрастал на фазе спада. Наблюдались и вспышки, в которых на фазе роста и максимума формировался спектр сложной формы с двумя составляющими. Ниже энергии 45 кэВ спектр, вероятно, формировался тепловым излучением горячей плазмы, а выше энергии 45 кэВ он мог быть сформирован тормозным излучением быстрых электронов. Такая форма спектра сохранялась и на фазе спада вспышки. С ростом энергии спектр излучения становился круче, что можно объяснить, если предположить, что функция распределения быстрых электронов, генерирующих тормозное рентгеновское излучение, имеет обрыв на некоторой максимальной энергии ~150...170 кэВ. Такой обрыв в спектре быстрых электронов может возникать за счёт их

взаимодействием с плазменными волнами с учетом нелинейного рассеяния этих волн на ионах фоновой плазмы.

Поляризация жесткого рентгеновского излучения

Солнечным спектрополяриметром СПР-Н впервые измерена линейная поляризация жесткого рентгеновского излучения от мощной вспышки (класса X-10) 29 октября 2003 г. В импульсной фазе вспышки поляризация достигала заметной величины (рис. 19), что является первым прямым доказательством не только существования самих пучков ускоренных частиц, но и подтверждением того, что эти частицы, скорее всего, ускоряются импульсным электрическим полем, а не каким-либо стохастическим механизмом.

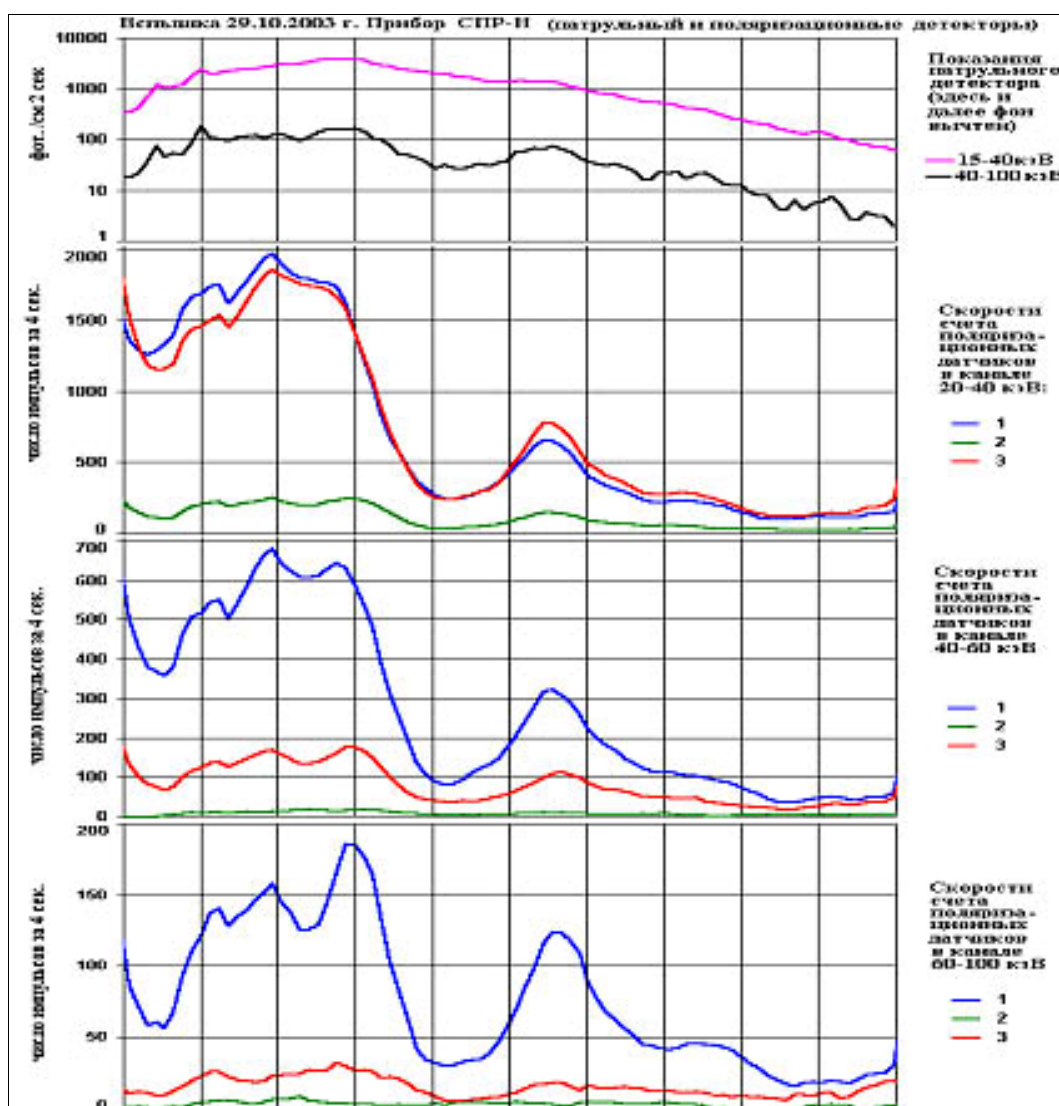


Рис. 19. Различия в показаниях (число импульсов за 4 с) трех поляризационных датчиков прибора СПР-Н (кривые разного цвета), иллюстрирующие наличие линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения в максимуме вспышки 29 октября 2003 г. (панель 2 — диапазон энергий 20...40 кэВ, панель 3 — 40...60 кэВ, панель 4 — 60÷100 кэВ).

Панель 1 — показания патрульного детектора (число фотонов/см²·с) в диапазонах энергий 15...40 и 40...100 кэВ.

Атомные процессы во вспышках

С помощью рентгеновского спектрометра РЕСИК и спектрофотометра ДИОГЕНЕСС выполнена детальная спектроскопическая диагностика вспышечной плазмы и атомных процессов во вспышках. Прибором РЕСИК впервые наблюдались сильные спектральные сателлитные линии переходов типа $1s^2-1snp$, $n = 3, 4, 5$ для ионов S (серы) и Si (кремния), спектральных линий ионов астрофизической плазмы, соответствующих переходам $1s-np$ и $1s^2-1snp$ для значений квантового числа $n \sim 4...9$ (рис. 20). Использование отношений интенсивностей этих спектральных линий дает новый метод температурной диагностики корональной плазмы. Благодаря высокой чувствительности рентгеновского спектрометра РЕСИК, позволяющей определять зависящее от содержания элементов отношение интенсивностей излучения в линии и в континууме, впервые определено абсолютное содержание в короне Солнца таких химических элементов как K (калия) и Cl (хлора) (рис. 21), измерены тысячи спектров различных элементов и ионов солнечной плазмы в неисследованном ранее спектральном диапазоне, обнаружены новые спектральные линии и проведено отождествление некоторых из них (рис. 22). Примером могут служить наблюдаемые линии высокоионизованного хлора (Cl XVI) в области $4,4...4,5 \text{ \AA}$. За период август – май 2003 г. получено около 1 млн линейчатых спектров. По многочисленным наблюдениям (за более чем 1200 временных интервалов для разных уровней солнечной активности) исследована зависимость спектров ионов солнечной плазмы (формы и интенсивности спектральных линий) от температуры (рис. 23). Создан каталог данных прибора РЕСИК, доступный на сайте (http://www.cbk.pan.wroc.pl/resik_catalogue.htm). На основе этих измерений подготовлен атлас спектральных линий Солнца в диапазоне $3,4...6,1 \text{ \AA}$. По измерениям спектрофотометра ДИОГЕНЕСС впервые определены абсолютные доплеровские сдвиги рентгеновских спектральных линий в течение всей фазы роста вспышки (вспышка X5.3 25 августа 2001 г.) (рис. 24), измерены сотни спектров гелий-подобных ионов Ca XIX, S XV и Si XIII, получено около 2500 рентгеновских линейчатых спектров для вспышек в период август–сентябрь 2001 г.

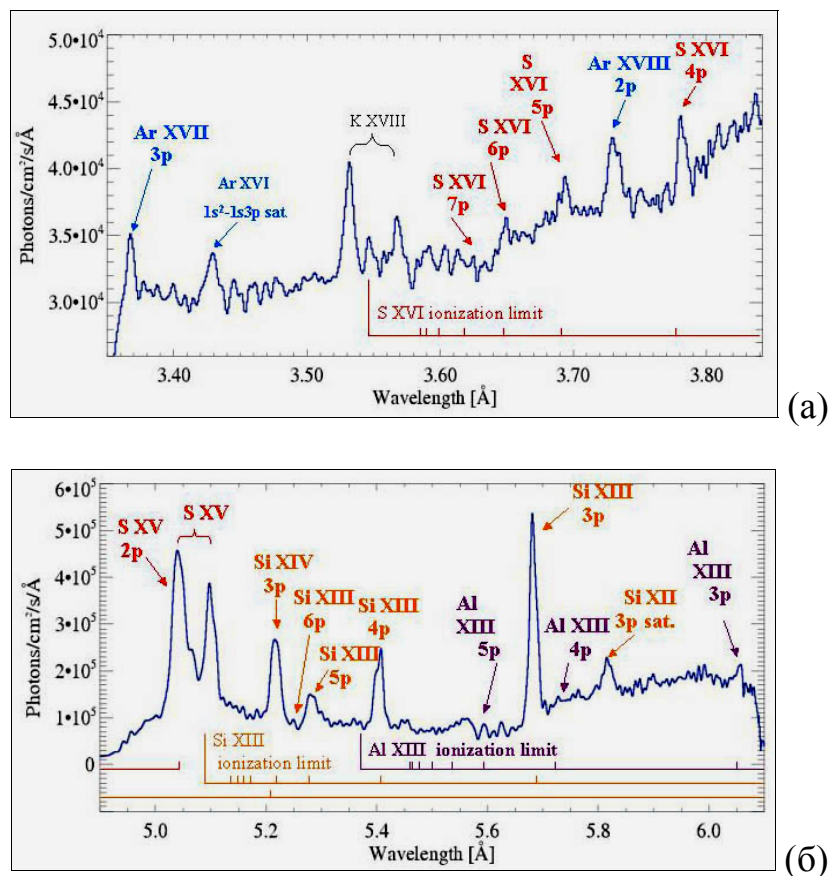


Рис. 20. Сильные спектральные спутничные линии иона S XV и др. ионов ((а) и (б)) и линии гелий-подобных ионов SiXIV и AlXIII (б), соответствующие атомным переходам с высокими значениями квантового числа n : от $n = 3$ до ионизационного предела

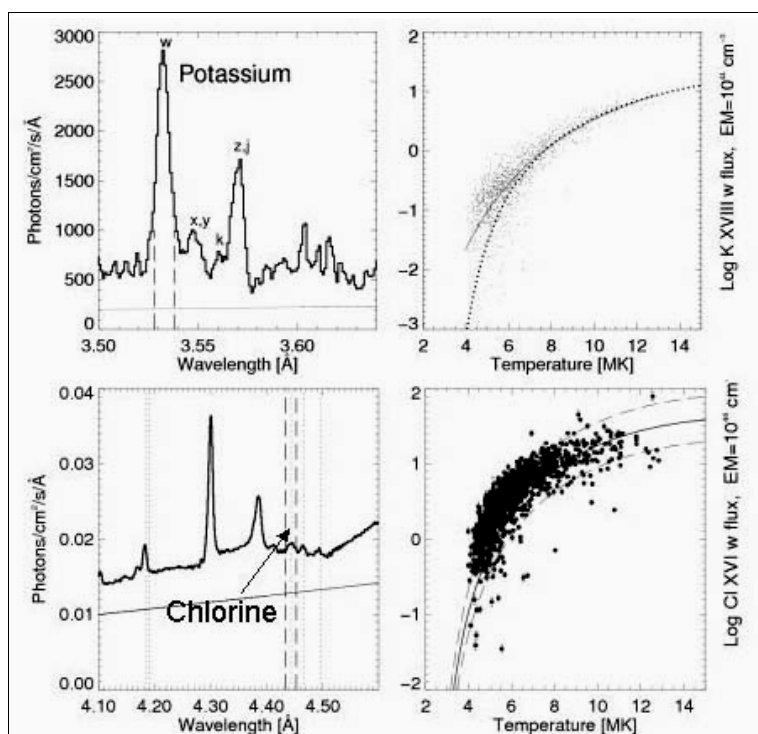


Рис. 21. Абсолютное содержание элемента К (калия) и CL (хлора) в солнечной атмосфере, определяемое по отношению интенсивностей излучения в линии и в континууме

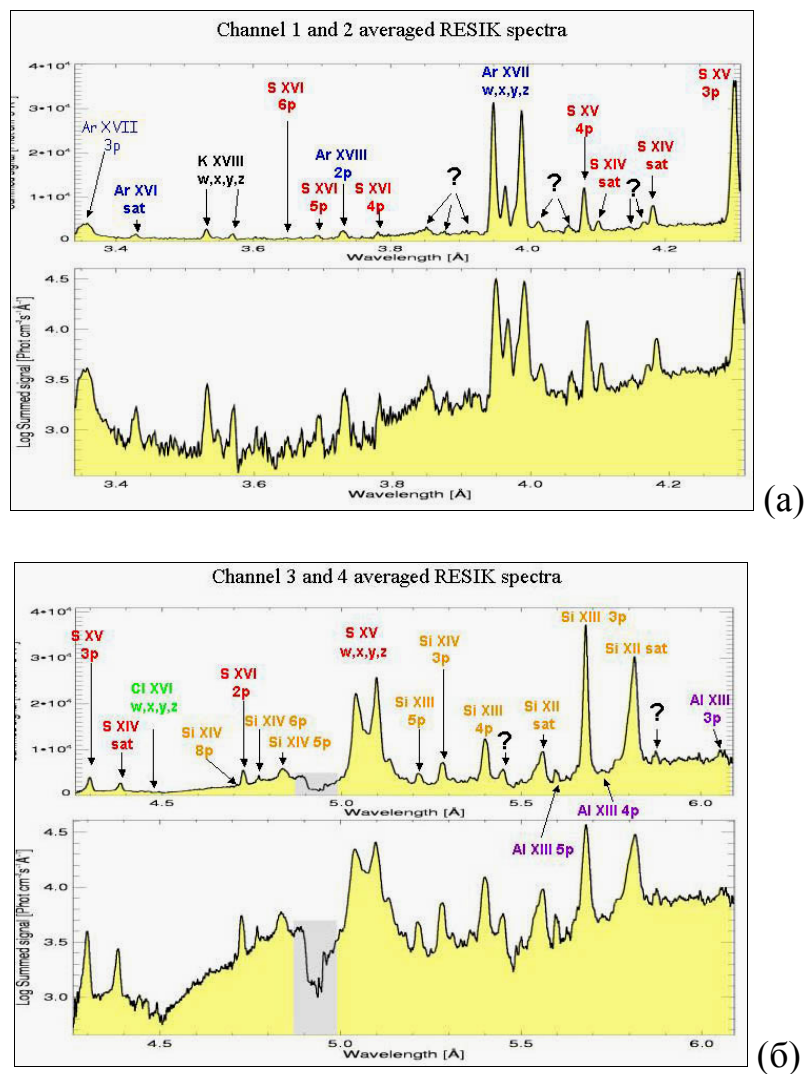


Рис. 22. Новые спектральные линии вспышечной плазмы:
(а) — в спектральном канале 3,4...4,3 Å прибора РЕСИК, (б) — в канале 4,4...6,1 Å

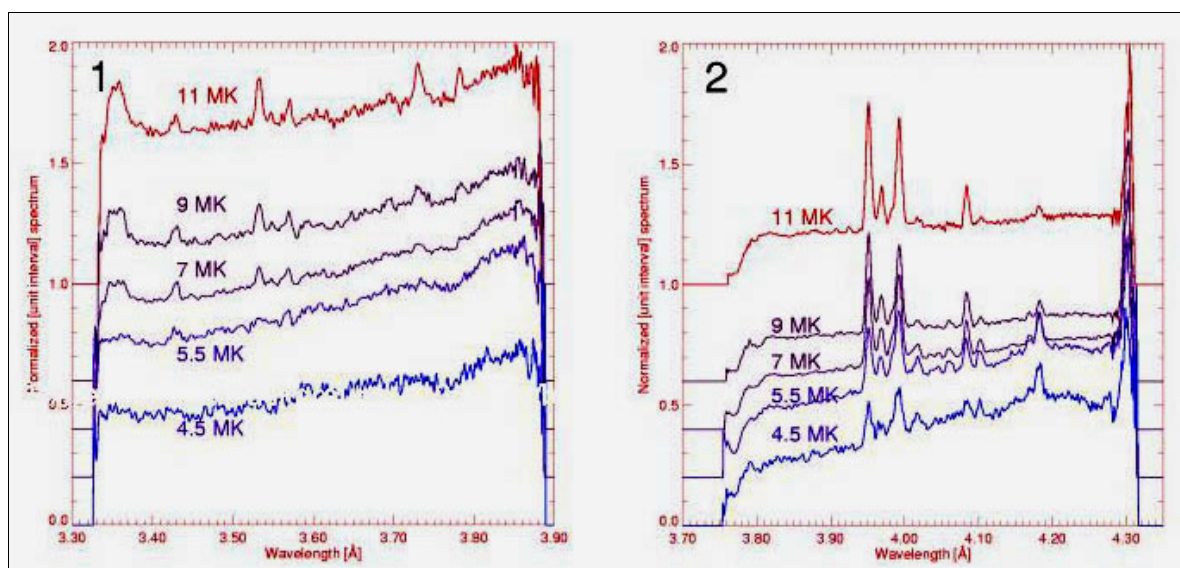


Рис. 23. Зависимость спектров излучения ионов солнечной плазмы от температуры плазмы

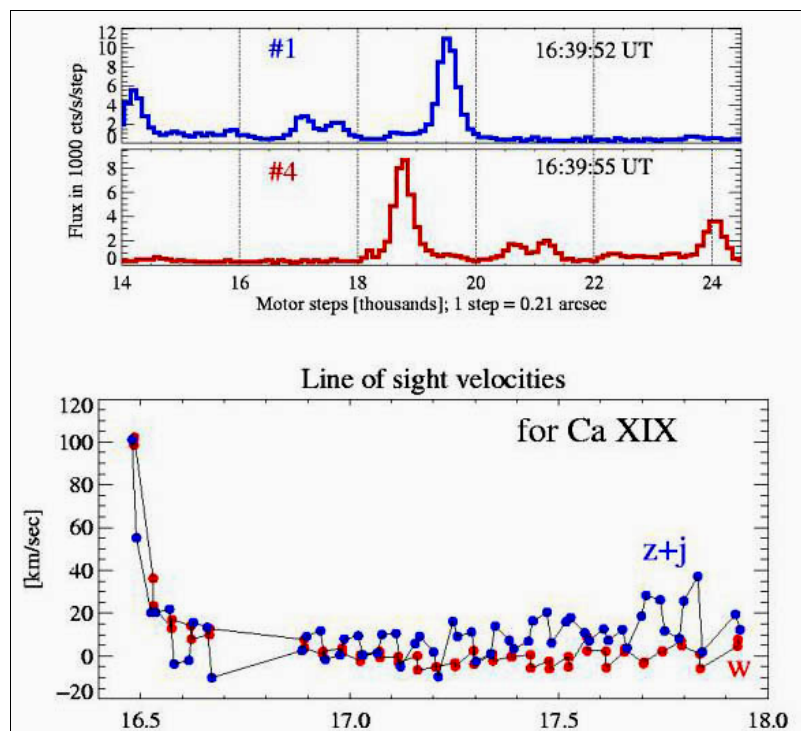


Рис. 24. Абсолютные доплеровские сдвиги рентгеновских линий и скорости горячей вспышечной плазмы на ранней фазе вспышки X5.3 25 августа 2001 г

Выполненный разными методами анализ спектров излучения от солнечных вспышек, полученных прибором РЕСИК, позволил определить термодинамические характеристики излучающей плазмы: температуру (T), меру эмиссии (EM), распределение дифференциальной меры эмиссии (DEM) с температурой, а также изучить их временные изменения. На рис. 25 показан рассчитанный в одно-температурном приближении на основе наблюдений и теоретических спектров временный ход температуры (верхняя кривая) и временные изменения так называемой меры термодинамики $ThM = T(EM)^{1/2}$ — величины, которая характеризует количество тепловой энергии плазмы, находящейся в излучающем объеме. Максимум температуры наблюдается на 10 мин. раньше максимума тепловой энергии. На рис. 26 для двух вспышек показано распределение дифференциальной меры эмиссии (DEM) (характеризующей количество плазмы, находящейся в отдельных температурных диапазонах) с температурой. Для вспышки класса M1.9 21 января 2003 г. (слева на рис. 26) кроме фазы роста (15:00 UT), максимума (15:15 UT) и затухания (16:30 UT), показана также кривая DEM , соответствующая фазе позднего затухания вспышки (18:15 UT). Общий вид распределений можно считать двухкомпонентным в течение 3 часов наблюдений: холодная плазма с температурой 5...8 МК и горячая с температурой 18...25 МК. Температура холодной компоненты почти не изменяется в течение вспышки, хотя существенно изменяется количество этой плазмы. Во время позднего затухания количество холодной плазмы почти на порядок меньше, чем во время фазы роста. Количество горячей плазмы во время затухания уменьшается значительно сильнее (на два

порядка), при этом, максимум температуры этой компоненты изменяется с 22 МК в максимуме до 20 МК через три часа после максимума. Для короткоживущей вспышки C5.8 (рентгеновской длительностью 12 мин), которая произошла 22 февраля 2003 г. (справа на рис. 26) большая часть плазмы сосредоточена в двух температурных компонентах. Однако, в этом случае охлаждение горячей плазмы от 22 МК на фазе роста до 19 МК на фазе затухания происходит в течение считанных (шести) мин. В фазе затухания количество горячей плазмы на порядок меньше в сравнении с фазой максимума.

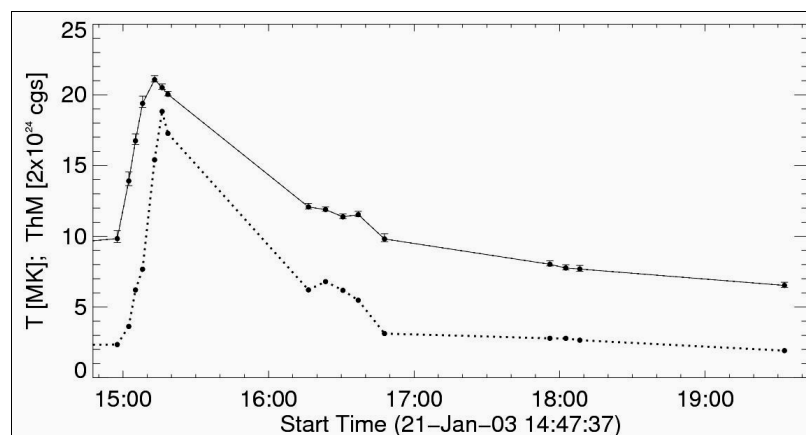


Рис. 25. Временные изменения температуры (верхняя кривая) и меры термодинамики (нижняя кривая) для вспышки 21 января 2003 г. Шкалы для этих кривых сдвинуты таким образом, чтобы кривые не пересекались.

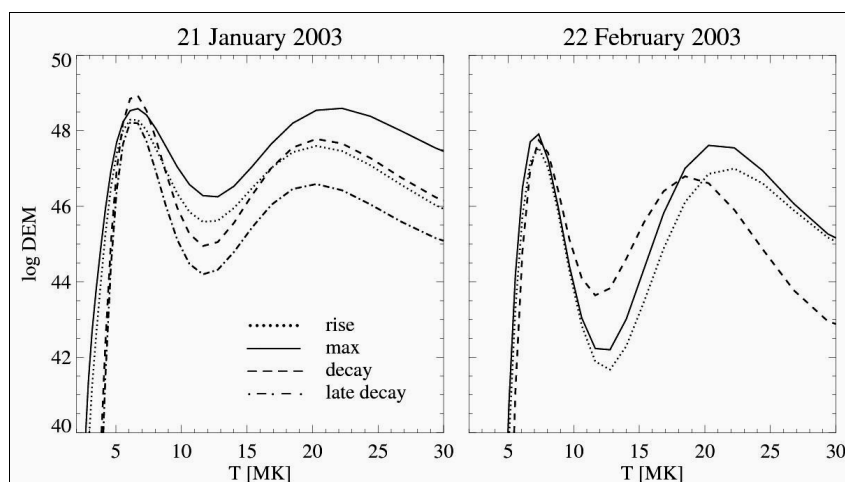


Рис. 26. Распределение дифференциальной меры эмиссии с температурой для двух разных вспышек: лимбовой, долгоживущей, рентгеновского класса M1.9 (21 январь 2003 г.) и короткоживущей вспышки класса C5.8, произошедшей на диске 22 февраля 2003 г.

Ядерные процессы во вспышках

По наблюдениям гамма излучения, которое генерируется при столкновениях ускоренных во вспышках частиц с ядрами солнечной атмосферы, приборами спутника КОРОНАС-Ф получена богатая

диагностическая информация об ускорительном процессе во вспышках и о составе атмосферы Солнца.

На рис. 27 приведен пример регистрации амплитудно-временным спектрометром ABC гамма-линий во вспышке 29 октября 2003 г., которые показывают наличие в солнечной атмосфере различных химических элементов и их изотопов. В данном случае это железо, магний, кремний, неон, кислород, углерод. Видна также особенность в спектре, соответствующая линии от захвата рожденных во вспышке нейтронов. Поскольку гамма-излучение вспышки складывается из излучения отдельных гамма-линий, возбуждаемых ускоренными протонами, то приведенный спектр гамма-излучения одновременно характеризует первичный спектр ускоренных во вспышке протонов, который является одной из важнейших характеристик процесса ускорения.

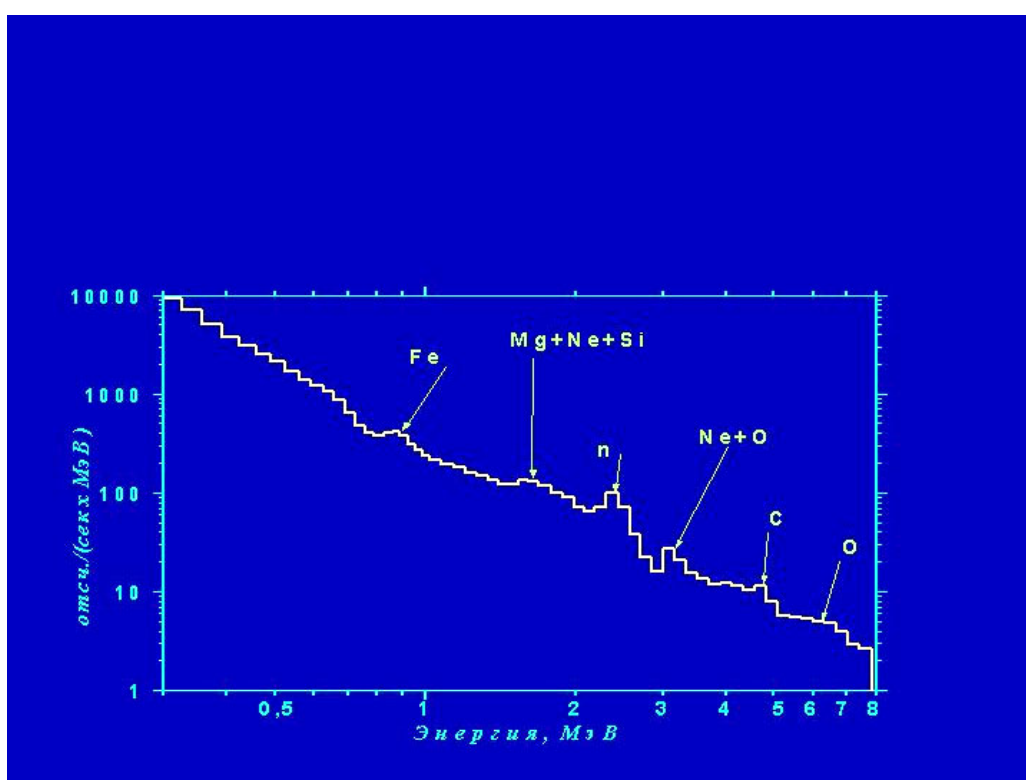


Рис. 27. Гамма-линии от вспышки 29 октября 2003 г., показывающие наличие в солнечной атмосфере различных химических элементов и их изотопов

Анализ временных профилей скорости счета гамма квантов, полученных прибором ABC от ряда солнечных вспышек в различных энергетических диапазонах, соответствующих ядерным линиям, позитронной линии и линии от захвата нейтронов, позволил установить присутствие во временной зависимости скорости счета гамма квантов структур с характерными временами от 16 до 80 с. Аналогичный анализ в диапазоне энергий 0,1...20 МэВ с временным разрешением 1 мс показал наличие во временных профилях ряда вспышек (в частности, во вспышке 20 января 2005 г.) тонких структур с характерными временами от 7 до 35 мс.

На околоземной орбите, рожденные в солнечных вспышках нейтроны, могут регистрироваться спутником «КОРОНАС-Ф» только для высоких энергий (больше 30 МэВ), так как при меньших энергиях они распадаются (на протон, электрон и электронное антинейтрино — бета-распад нейтрона, время распада нейтронов в вакууме 16 мин), не долетев до Земли. Энергичные нейтроны во вспышках в отличие от протонов и электронов, которые ускоряются импульсными электрическими полями во вспышках, могут возникнуть только в ядерных реакциях при взаимодействии ускоренных протонов с нуклонами (или ядрами) плазмы солнечной атмосферы. Так как нейтроны — не заряженные частицы и на них магнитное поле не влияет, то они летят от места возникновения до детектора по прямой, в отличие от заряженных протонов и электронов, которые двигаются вдоль силовых линий магнитного поля, проходя больший путь, и соответственно при тех же энергиях или скоростях они затрачивают большее времени, т. е. между приходом к Земле нейтронов и протонов, рожденных одновременно в солнечной вспышке, должно возникать запаздывание. Для мощных вспышек октября-ноября 2003 г. на рис. 28 показана регистрация спектрометром солнечных нейтронов и гамма-излучения СОНГ гамма-излучения и потоков нейтронов. Эти данные в сопоставлении с другими наблюдениями позволили определить момент выхода ускоренных протонов и энергичных нейтронов из солнечной короны.



Рис. 28. Потоки гамма-излучения и нейтронов от солнечных вспышек 28 октября и 4 ноября 2003 г.

Ультрафиолетовое излучение солнечных вспышек

По результатам наблюдений солнечным ультрафиолетовым радиометром СУФР-СП-К и ультрафиолетовым солнечным спектрофотометром ВУСС-Л измерены потоки ультрафиолетового излучения от солнечных вспышек. На рис. 29. показан пример таких измерений в линии $L\alpha$ (в области длин волн короче 130 нм) аппаратурой ВУСС для вспышки 21.01.2003 г. Для вспышек рентгеновского класса C9-M1 типичная величина изменений ультрафиолетового излучения в полосе вблизи линии $L\alpha$ составляет примерно 0,5 %. Для самых мощных вспышек рост ультрафиолетового излучения в полосе 120 нм не превышает нескольких процентов.

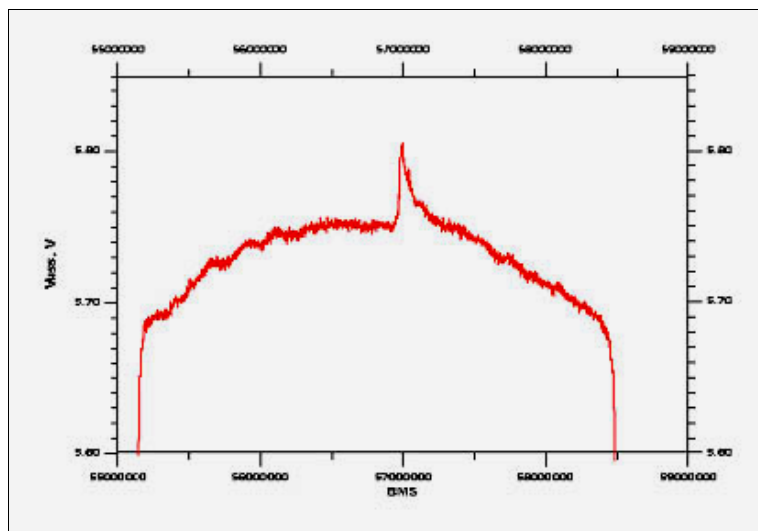


Рис. 29. Регистрация потока ультрафиолетового излучения от солнечной вспышки 21 января 2003 г. в линии $L\alpha$ (в области длин волн короче 130 нм)

Измерения солнечных космических лучей в околоземном космическом пространстве

Проводя измерения солнечных космических лучей вдоль своей орбиты, комплексом СКЛ спутника «КОРОНАС-Ф» получен непрерывный ряд данных о потоках солнечных энергичных частиц, причем данные о потоках солнечных электронов с энергиями выше 300 кэВ являются уникальными, так как других измерений в настоящее время не существует. Выполненные измерения солнечных космических лучей позволили изучить динамику радиационных поясов Земли и проникновение солнечных энергичных частиц в магнитосферу в периоды сильных геомагнитных возмущений, включая не только внутренний и внешний радиационный пояс, но и область между ними.

На примере событий октября–ноября 2003 г., когда мощные вспышки на Солнце вызвали две очень сильные магнитные бури, была изучена деформация магнитосферы и радиационных поясов, а именно движение радиационных поясов внутрь магнитосферы и связанное с этим проникновение туда солнечных энергичных частиц (см. рис. 30). При этом обнаружен новый эффект, состоящий в исчезновении внешнего

радиационного пояса электронов на главной фазе магнитных бурь при энергиях выше 1.5 МэВ, что связано, по-видимому, с высыпанием электронов в конус потерь при возмущениях геомагнитного поля.

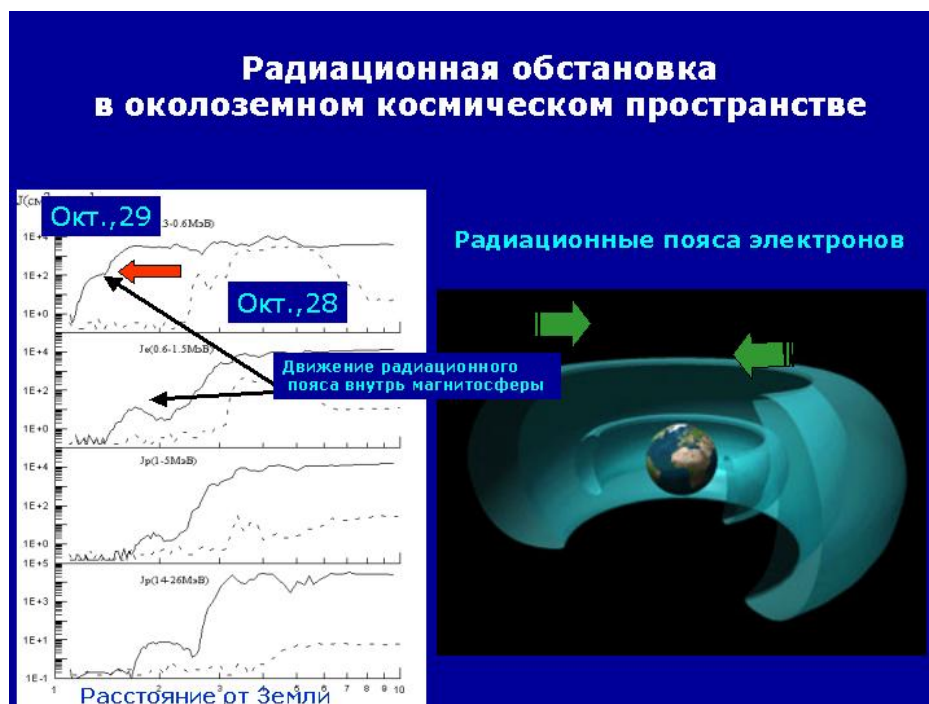


Рис. 30. Показано движение радиационных поясов внутрь магнитосферы и связанное с этим проникновение туда солнечных энергичных частиц в событии 28–29 ноября 2003 г.

В регистрации солнечных космических лучей комплексом СКЛ и магнитосферных проявлений от вспышек и солнечных выбросов интересным был также период 15–21 января 2005 г., в котором наблюдалось несколько вспышек, давших большие потоки энергичных частиц и корональный выброс массы, который вызвал сильные возмущения магнитосферы и радиационных поясов. Наиболее полные данные получены для вспышки 20 января 2005 г. (рис. 31), которая была зарегистрирована, когда спутник находился в области экватора. Во время уменьшения потока энергичных гамма-квантов на фоне потока галактических космических лучей было измерено дополнительное возрастание потока энергичных заряженных частиц (см. рис. 31, нижняя панель), и, используя широтное геомагнитное обрезание (т. е. по аномалии широтного хода галактических космических лучей), была определена энергия частиц первого прихода (~ 5 ГэВ). Возрастание потока солнечных энергичных частиц было зарегистрировано на оболочке с $L \sim 1,5$ в 6:56 UT, а возрастание показаний нейтронного монитора на станции South Pole началось в 6:49 UT. Регистрация ускоренных во вспышке протонов на оболочке $L \sim 1,5$ с пороговой энергией 6 ГэВ с запаздыванием указывает на то, что это значение энергии является для них максимальным. Предварительный анализ данных приборов СПР-Н и СОНГ КОРОНАС-Ф и ИСЗ GOES показал, что основная часть энергии данной вспышки выделилась в виде ускоренных частиц. Корональный выброс массы от вспышки достиг

магнитосферы Земли 21 января, и магнитосферное возмущение развивалось в основном при положительном значении компоненты V_z межпланетного магнитного поля. Дневная магнитопауза приблизилась к Земле на расстояние до $5 R_E$, внешняя граница радиационного пояса переместилась на оболочку с $L \sim 3$, а по окончании бури радиационный пояс восстанавливался длительное время, в отличие от классических бурь.

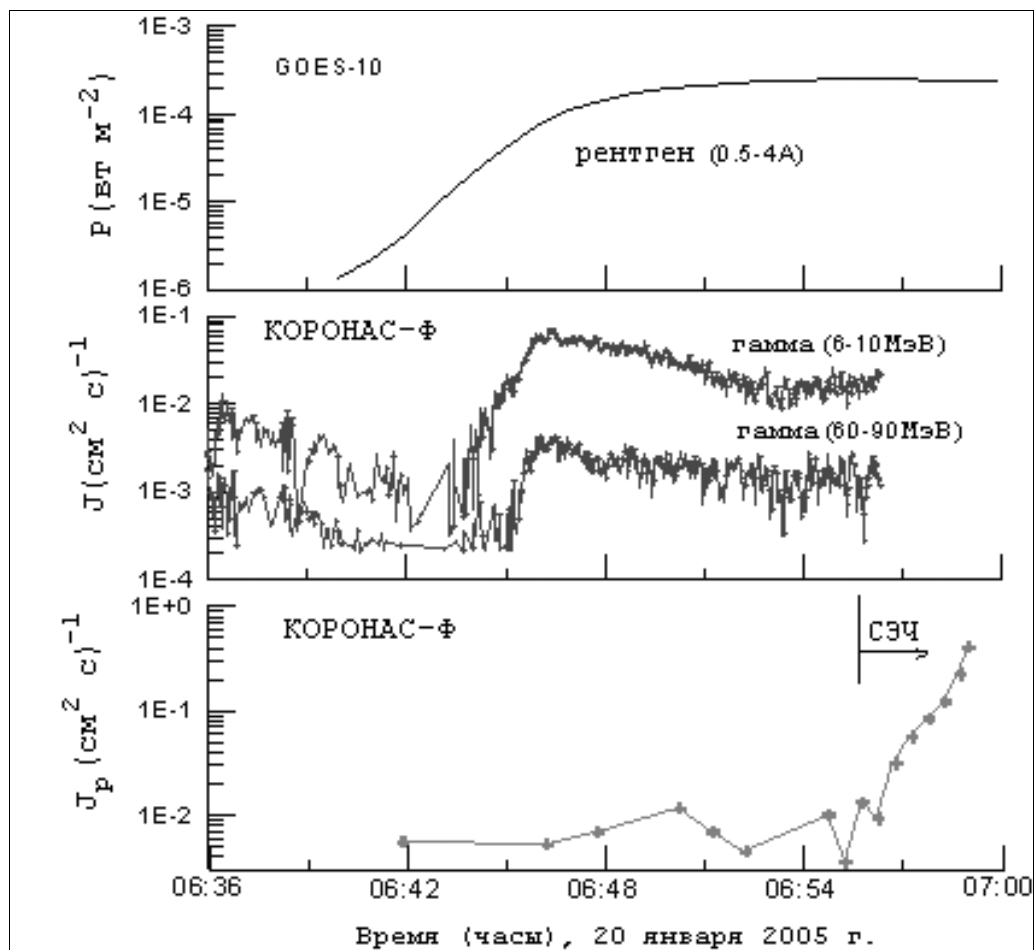


Рис. 31. Излучение солнечной вспышки 20 января 2005 г. Верхняя панель — поток теплового рентгеновского излучение (3...24 кэВ, ИСЗ GOES-10). Средняя панель — скорость счета жестких гамма-квантов: от тормозного излучения в диапазоне 6...10 МэВ и от распада пионов, возникших в результате ядерных реакций ускоренных релятивистских протонов с ядрами короны Солнца (40...90 МэВ). Нижняя панель — дополнительное возрастание скорости счета энергичных заряженных частиц (протонов) в диапазоне энергий > 100 МэВ. СЭЧ — солнечные энергичные частицы

Наряду с известными высыпаниями энергичных частиц из магнитосферы в ионосферу в приполярных областях и в зоне Бразильской аномалии прибором АВС обнаружены локализованные (около 30° по географической широте и около 10° по географической долготе) квазистационарные низкоширотные и экваториальные высыпания (рис. 32), происхождение которых пока неизвестно. Эти высыпания характеризуются заметным увеличением фона радиации (на 20–30 %), время их жизни может достигать 8 суток.

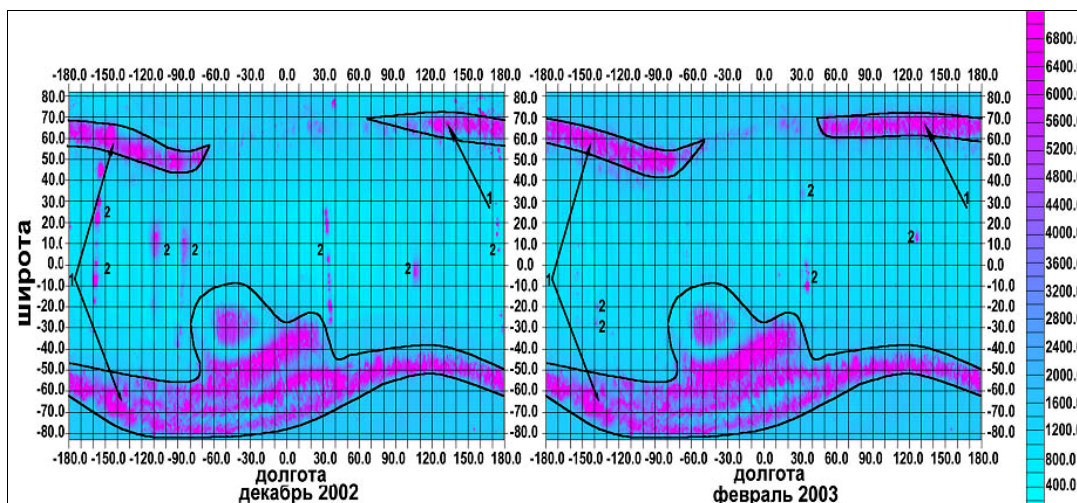


Рис. 32. Карты квазистационарных высыпаний энергичных частиц из магнитосферы в ионосферу: 1 — радиационные пояса, 2 — квазистационарные высыпания

Изучение верхней атмосферы Земли

С помощью солнечного рентгеновского телескопа спутника КОРОНАС-Ф исследована верхняя атмосфера Земли по поглощению жесткого рентгеновского излучения Солнца при заходах и выходах спутника из тени (см. рис. 33). По данным таких наблюдений определены высотные зависимости коэффициентов поглощения рентгеновского излучения с разрешением по высоте, улучшенным примерно в 100 раз (рис. 34). Изучена зависимость от уровня солнечной активности плотности и состава земной атмосферы на высотах до 500 км, определено содержание молекулярного азота и атомарного кислорода. Для аналогичных наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне с помощью радиометра СУФР и спектрофотометра ВУСС разработана методика определения содержания молекулярного кислорода — одного из основных компонентов атмосферы. Все эти наблюдения дали экспериментальные данные для построения современной модели земной атмосферы.

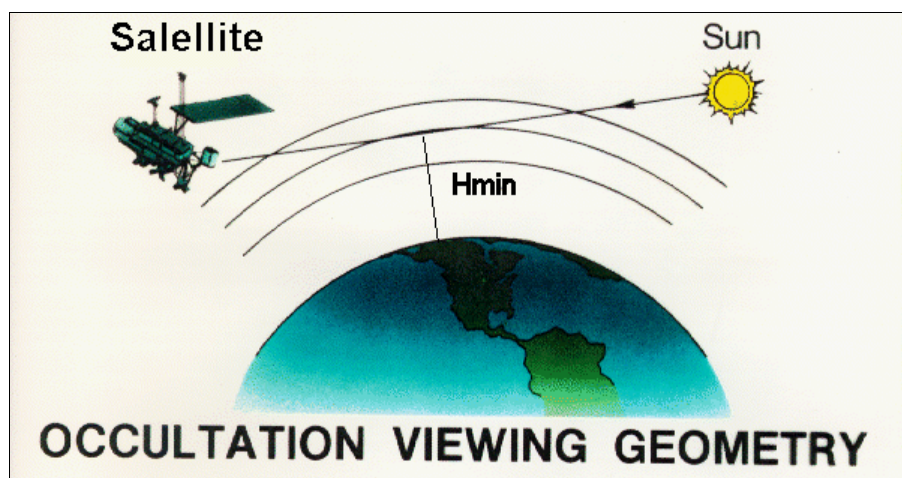


Рис. 33. Схема измерений прозрачности земной атмосферы по наблюдениям Солнца рентгеновским телескопом на спутнике «КОРОНАС-Ф»

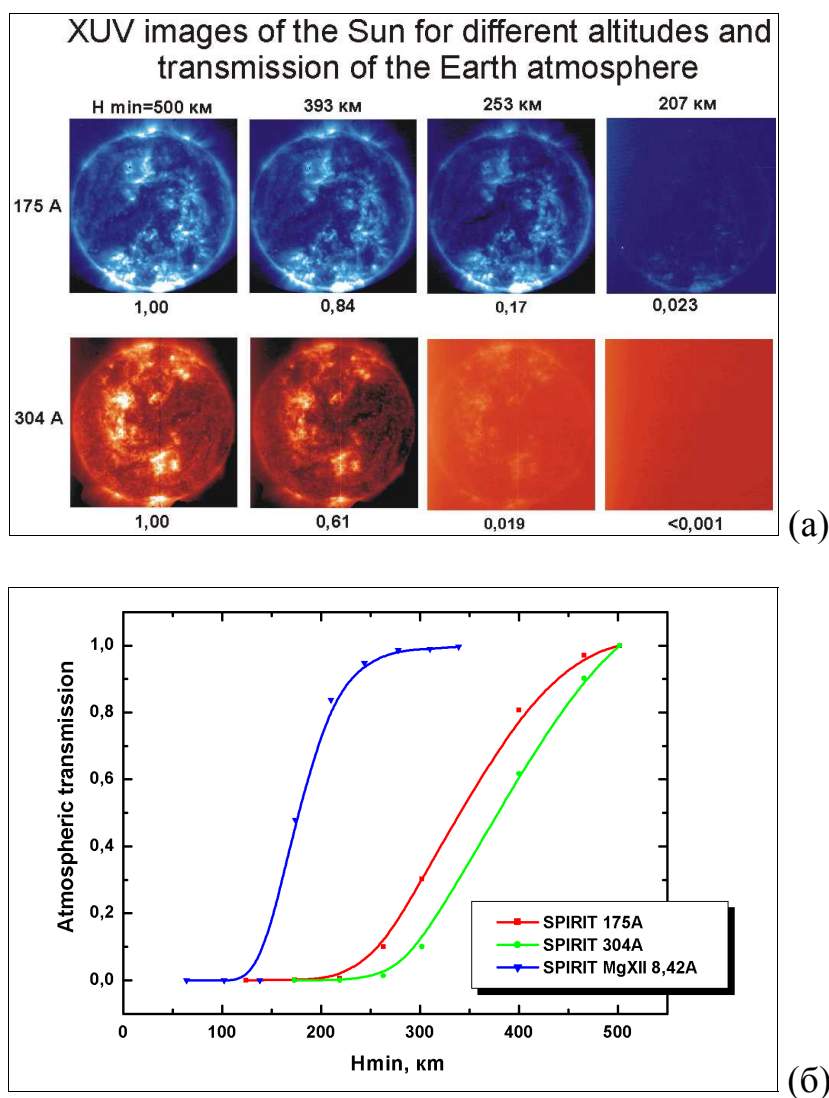


Рис. 34. Рентгеновские изображения Солнца (а) и зависимости прозрачности земной атмосферы от высоты H_{min} (б)

Регистрация космических гамма-всплесков гамма-спектрометром ГЕЛИКОН

Помимо солнечных наблюдений установленный на борту гамма-спектрометр ГЕЛИКОН спутника «КОРОНАС-Ф» регистрировал космические гамма-всплески. 27 декабря 2004 г. было зарегистрировано редчайшее событие — отражение от Луны гигантского гамма-всплеска нейтронной звезды, находящейся в глубинах нашей Галактики на расстоянии в десятки тысяч световых лет. Это всего четвертый случай регистрации такого гигантского гамма-всплеска за все время существования внеатмосферной гамма-астрономии с 60-х гг. прошлого века. Прямой сигнал этого гамма-всплеска имеет чудовищную интенсивность и ни один детектор не может ее измерить — происходит «зашкал». При этом нельзя определить временной профиль всплеска и оценить энергию взрыва на нейтронной звезде. Спутник «КОРОНАС-Ф» был экранирован Землей от прямого направления на источник гамма-всплеска и регистрация отраженного, ослабленного в 50 тыс. раз сигнала, позволила это сделать. По

предварительным оценкам энергия взрыва на нейтронной звезде составила около 10^{44} эрг, что существенно превышает мощность оптического излучения всех ста миллиардов звезд нашей Галактики. Это первое в мировой практике наблюдение отражения космического гамма-всплеска от небесного тела или, другими словами, первая локация небесного тела при помощи природного сверхмощного импульса гамма-излучения.

Заключение

За время работы спутника «КОРОНАС-Ф»:

- накоплен уникальный архив спектральных изображений Солнца и солнечной короны — более 1 млн снимков;
- на основе многочисленных спектроскопических измерений обнаружены новые спектральные линии, впервые определено абсолютное содержание в солнечной короне ряда элементов, разработаны новые методы диагностики астрофизической плазмы;
- получены редкие данные о рентгеновском, ультрафиолетовом, гамма и корпускулярном излучении от солнечных вспышек и их воздействии на магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли;
- по результатам наблюдений составлены объемные каталоги и архивы данных, которые в течение многих лет послужат основным источником информации для исследователей, для планирования новых экспериментов по исследованию в области солнечно-земной физики.

3.4.2. СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА

3.4.2.1. Многозондовые исследования особенностей ускорения пучков ионов в магнитосфере. Мультиплетная структура ускорительных процессов

Высокоскоростные ($V \sim 2500$ км/с) пучки ионов (бимлеты), движущиеся вдоль магнитного поля к Земле в пограничной области плазменного слоя являются отражением сложных процессов неадиабатического ускорения ионов в токовом слое вблизи, так называемой X-линии, то есть в области сепаратриссы разделяющей еще открытые силовые линии магнитного поля высокоширотных долей геомагнитного хвоста и уже замкнутые силовые линии магнитного поля, содержащие горячую плазму плазменного слоя. Как правило, (во время спокойных и умеренно-возмущенных геомагнитных периодов) область X-линии находится в удаленной от Земли части токового слоя (на расстояниях $\geq 300\,000$ км) и прямые исследования происходящих в ней ускорительных процессов затруднены. Однако, изучение закономерностей появления бимлетов в пограничной области плазменного слоя, их пространственных распределений и тонкой структуры даст нам необходимую информацию о свойствах

ускорительных процессов происходящих в дальних областях геомагнитного хвоста. Для исследования бимлетов мы использовали как статистический анализ, предназначенный для выявления общих закономерностей их появления и распределения в хвосте, так и детальный анализ отдельных случаев с целью установить внутреннюю структуру и пространственно-временные характеристики бимлетов, отражающие пространственные масштабы и время жизни источников их генерации.

Для статистического анализа мы использовали базу данных наблюдений бимлетов спутником «Интербол-1», которая включала 500 событий. Ранее было установлено, что появление бимлетов вблизи границы плазменного слоя практически не зависит от уровня геомагнитной активности. Поэтому мы сконцентрировали усилия на выяснении вопроса о влиянии межпланетного магнитного поля (ММП) на эффективность ускорения (частоту наблюдения) бимлетов. Мы исследовали зависимость частоты наблюдения бимлетов и их пространственного распределения над нейтральным слоем от направления (часового угла) ММП для трех секторов хвоста: полуночного ($|Y_{GSM}| < 7R_e$, где R_e — радиус Земли), утреннего и вечернего флангов. Установлено, что:

1. Частота появления бимлетов в хвосте зависит от предыстории в направлении ММП (от средней величины часового угла, усредненного, по крайней мере, за час до наблюдения бимлета). Эта зависимость различна для полуночного сектора хвоста и для его флангов.

- Так, в полуночном секторе бимлеты практически с равной вероятностью наблюдаются при любых направлениях ММП, кроме северного. При северном ММП вероятность наблюдения бимлетов резко снижается.
- При северном ММП бимлетов на флангах нет совсем.
- Частота наблюдения бимлетов на флангах резко возрастает в периоды когда ММП имеет выраженный Y-компонент.

Резкое уменьшение частоты наблюдения бимлетов при северном ММП, наблюдаемое во всех секторах хвоста, по-видимому, обусловлено тем, что в эти периоды ослабевает напряженность электрического поля конвекции, которое согласно теории, играет одну из важнейших ролей в неадиабатическом ускорении бимлетов.

2. Пространственное распределение бимлетов над нейтральным слоем (НС) также зависит от часового угла ММП:

- В периоды южного ММП бимлеты в полуночном секторе наблюдаются в основном на высотах не более $5R_e$ от НС, в то время как в периоды когда ММП имеет существенный северный компонент, бимлеты наблюдаются высоко над НС (до $10R_e$).
- В периоды, когда ММП имеет существенный азимутальный (Y-компонент) пространственное распределение бимлетов на утреннем и вечернем флангах различно. В периоды, когда $B_Y^{ММП} > 0$ бимлеты на утреннем фланге наблюдаются в основном вблизи НС

(на высотах $< 2R_E$), в то время как на вечернем фланге они наблюдаются на больших высотах ($3...5R_E$) над НС. В интервалы времени, когда $B_Y^{ММП} < 0$, ситуация обратная.

Асимметрия в пространственном распределении бимлетов на флангах в периоды азимутального ММП, возможна, связана с появлением в хвосте составляющей конвекции направленной вдоль $+Y/-Y$ в зависимости от знака $B_Y^{ММП}$. Благодаря этой конвекции бимлеты за время пролета от источника до Земли смещаются вдоль $+Y/-Y$ и, таким образом, источники бимлетов регистрируемых на разных флангах при данном $B_Y^{ММП}$ должны находиться на разных расстояниях от Земли.

К сожалению, измерения бимлетов спутником «Интербол» имели существенный недостаток — из-за того, что они производились одним спутником, мы не могли разделить временной и пространственный эффекты в наблюдении бимлетов и определить время их жизни и пространственные размеры. Для изучения этих характеристик мы использовали данные, полученные четырехспутниковым европейским проектом Cluster. В результате удалось установить, что:

1) бимлеты являются скорее пространственными, чем временными структурами и наблюдаются, в среднем, в течение 5–10 мин, то есть время жизни источников их ускорения составляет как минимум несколько минут;

2) бимлеты представляют собой вытянутые вдоль магнитного поля филаменты (их размер вдоль поля $\geq 25R_E$). Однако их размер поперек магнитного поля довольно мал: $\leq 1R_E$;

3) с бимлетом связано распространяющееся к Земле с альвеновской скоростью возмущение, которое искривляет силовые линии магнитного поля, вдоль которых распространяются ионы бимлета. В результате бимлет приобретает форму «змейки». Такая структура бимлета может сформироваться в результате возникновения шланговой неустойчивости в момент выхода бимлета из источника расположенного в дальних областях токового слоя в высокоширотные доли хвоста.

Кроме того, полученные с помощью Cluster данные измерений с высоким разрешением функций распределения бимлетов по скоростям позволили впервые получить экспериментальные доказательства резонансного характера ускорения бимлетов. Теория резонансного ускорения предсказывала, что бимлеты должны ускоряться в токовом слое в пространственно локализованных областях — резонансах (рис. 1с), причем скорость бимлета, ускоренного в резонансе с порядковым номером N , должна быть пропорциональна номеру этого резонанса согласно закону: $V_N \sim N^{2/3}$. Мы впервые наблюдали «двухпиковые» распределения (рис. 1а, б), то есть функции распределения образованные двумя бимлетами имеющими существенно различные скорости вдоль магнитного поля и наблюдающиеся, тем не менее, одновременно в одной и той же точке пространства. Это доказывает наличие в токовом слое как минимум двух различных областей ускорения бимлетов. На основе анализа 100 подобных распределений мы

статистически доказали справедливость вышеуказанного закона, который, судя по всему, является универсальным, так как не зависит от модели магнитного поля в токовом слое.

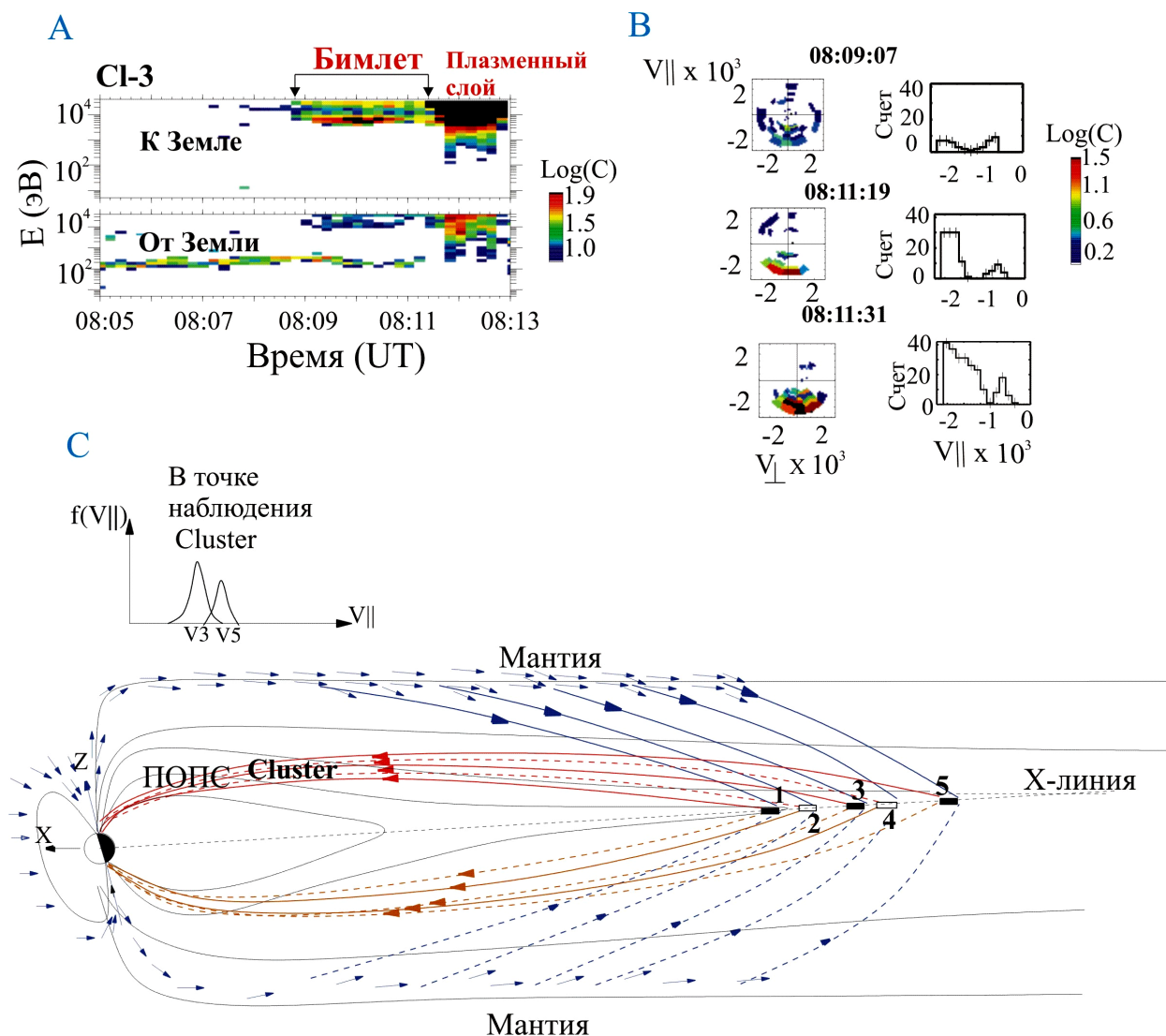


Рис. 1. а — спектрограмма ионов, измеренная 01.09.2003 в пограничной области плазменного слоя геомагнитного хвоста спутниками Cluster; на верхней панели, соответствующей ионам, движущимся к Земле, видны два бимлета — один с энергией ~ 5 кэВ, а другой — с энергией ~ 30 кэВ; б — левая колонка — двухмерные функции распределения бимлетов по скоростям, построенные в плоскости (V_{par}, V_{per}) ; правая колонка — одномерный срез функций распределения вдоль направления магнитного поля, на котором четко видны два пика соответствующие двум бимлетам; в — иллюстрация резонансного характера ускорения бимлетов в токовом слое и образование двухпиковой функции распределения бимлетов вблизи Земли

3.4.2.2. Теоретическое моделирование самосогласованных тонких токовых слоев в магнитосфере Земли

Построена модель токового слоя в хвосте магнитосферы Земли, в которой, наряду с протонами, учтены тяжелые ионосферные ионы кислорода

O^+ . Система самосогласованных уравнений Власова-Максвелла для неадиабатических ионов и замагниченных электронов решена численно. Получены полный и парциальные профили плотностей тока, плазмы и магнитных полей как функции координаты Z поперек слоя. Проанализирована зависимость отношения парциальных токов к полному току от отношения концентраций O^+ и H^+ ионов на бесконечности (см. рис. 1) и отношения их температур. Показано, что в естественных условиях вклад ионов O^+ в полный ток не превышает 30 % (рис. 2), в то же время наличие в плазме ионов кислорода способствует расширению токового слоя приблизительно в 5–10 раз (рис. 3). Модель согласуется с наблюдениями спутников Cluster, Prognos, свидетельствующих о том, что ток поперек магнитосферного хвоста может частично поддерживаться ионами ионосферного кислорода и что толщины наблюдаемых тонких токовых слоев часто составляют 1,5–3 тыс. км, что существенно больше протонного гирорадиуса.

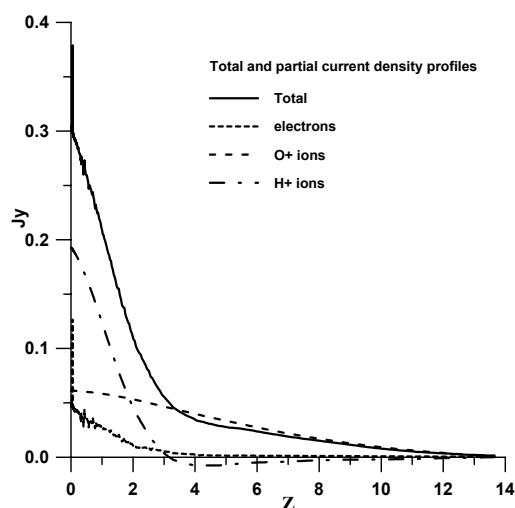


Рис. 2. Вклад ионов O^+ и H^+ в полный ток в зависимости от отношения концентраций ионов O^+ и H^+

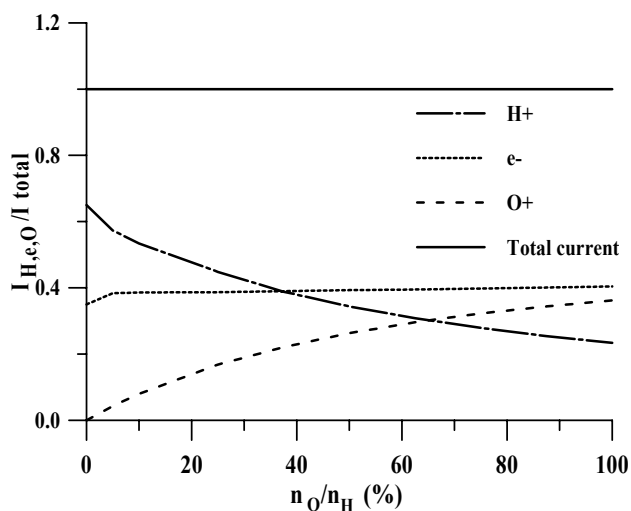


Рис. 3. Распределение токов ионов O^+ и H^+ поперек хвоста магнитосферы

3.4.2.3. Сдвиговая волнообразная деформация плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли

Реализация многоспутникового проекта «Кластер» впервые позволила на регулярной основе определять конфигурацию токового слоя хвоста магнитосферы Земли прямыми, а не косвенными методами. Проанализированы достаточно часто наблюдавшиеся в течение 2001–2004 гг. волнообразные пересечения токового слоя, характеризующиеся изменяющейся в процессе колебания ориентацией слоя. Показано, что эти вариации могут быть представлены как сдвиговая деформация хвоста магнитосферы, вызванная волной почти вертикального относительного смещения соседних магнитных трубок, а не изгибом трехмерного токового слоя. Определены характерные амплитуды и длины волны таких вариаций, составляющие несколько радиусов Земли. Колебания являются нелинейными, так как амплитуда увеличивается с увеличением крутизны фронта волны (рис. 4).

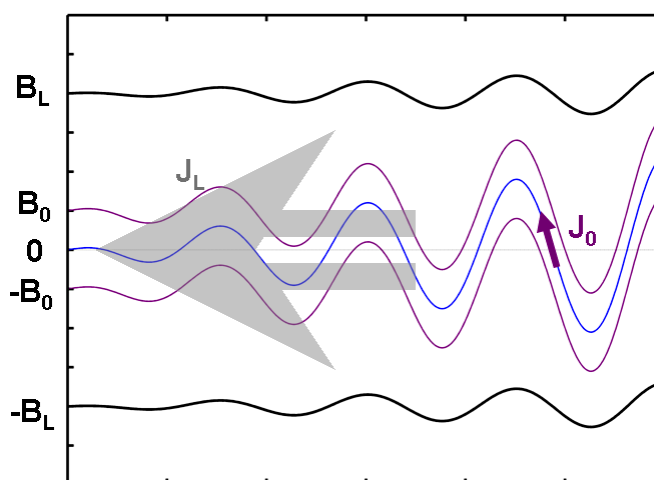


Рис. 4. Качественное представление возмущений нелинейных волн *kink*-типа, деформирующих токовый слой в хвосте магнитосферы Земли

3.4.2.4. Свойства разрывов в солнечном ветре по данным одновременных измерений на пяти космических аппаратах (INTERBALL, WIND, ACE, GEOTAIL, IMP8)

В работе были использованы данные измерений магнитного поля на пяти космических аппаратах: INTERBALL, WIND, ACE, GEOTAIL и IMP8, которые одновременно находились в солнечном ветре в 1998–1999 гг. Используя наблюдения межпланетного магнитного поля, из набора данных были выделены разрывы в плазме солнечного ветра, надежно идентифицируемые на всех пяти аппаратах. Определены скорость распространения, оценки ускорения и кривизны фронта, а также ориентация нормали разрыва. В результате получено, что разрывы «вморожены» в

солнечный ветер и переносятся вместе с потоком плазмы, фронты плоские, по крайней мере на шкале разнесения аппаратов, радиусы кривизны превосходят $400R_E$ (R_E — радиус Земли, равный 6380 км). Большинство разрывов хорошо аппроксимируются плоским токовым слоем (тангенциальным разрывом), по обе стороны которого магнитное поле параллельно его плоскости (рис. 5–7).

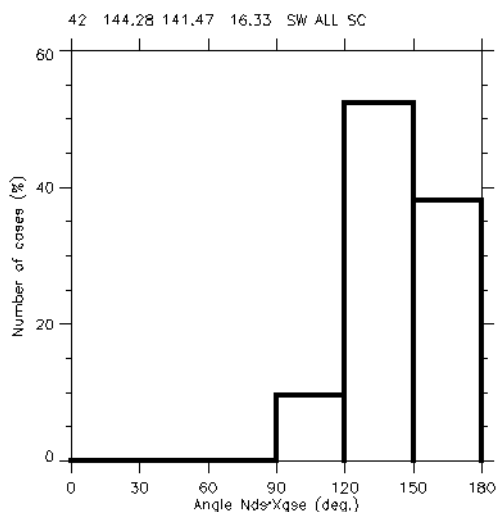


Рис. 5. Разрывы в плазме солнечного ветра; угол между направлением на Солнце и нормалью к фронту разрыва 36°

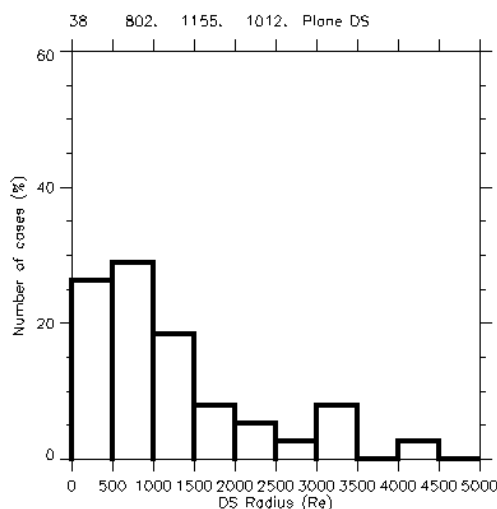


Рис. 6. Разрывы в Солнечном ветре, их радиусы кривизны в рамках модели сферического фронта; типичные значения превышают $400R_E$, т. е. фронт практически плоский

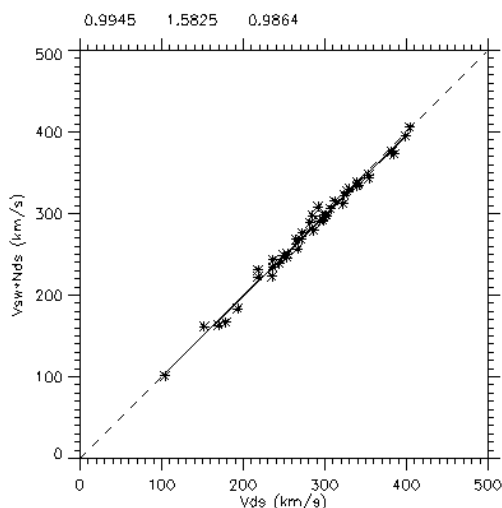


Рис. 7. Скорость движения разрыва по отношению к проекции скорости солнечного ветра на нормаль к разрыву

3.4.2.5. Собран и проанализирован обширный экспериментальный материал, относящийся к экстремально активным явлениям в октябре–ноябре 2003 года и в ноябре 2004 года

Этот материал был получен, в основном, отечественными исследователями (более 60 ученых из более 10 научных организаций РФ). Он состоит из наблюдений Солнца (КА КОРОНОС-Ф, SOHO, GOES, РАТАН-600 и группа оптических и радио телескопов), гелиосферы (КА ACE, WIND, Ulysses и прибор HEND на КА Odessey) и магнитосферы и ионосферы Земли (КА «КОРОНОС-Ф», «Экспресс-А2 и А3», «Метеор-3М», а также широкая сеть магнитных и геофизических станций и нейтронных мониторов). Как хорошо видно на рис. 8, за 16 суток (с 19 октября) в трех активных областях на Солнце произошло 16 больших вспышек, 11 из которых имели рентгеновский балл X. Одна из них (4 ноября) привела к зашкалу рентгеновских приборов на уровне X17.2. Магнитная буря 30 октября достигла величины $Dst = -401$ нТс. Когда эти активные области вернулись во второй половине ноября на видимую сторону Солнца, они проявили сравнительно малую вспышечную активность, однако на Земле была 2-ая за всю историю наблюдений магнитная буря с $Dst = -472$ нТс. Спустя год после экстремальных событий на Солнце, в гелиосфере и на Земле в октябре–ноябре 2003 г. похожая ситуация повторилась в ноябре 2004 г. (см. рис. 8). В работе приводятся основные наблюдательные данные, относящиеся к периоду, когда на Земле наблюдалась сильная магнитная буря с $Dst = -373$ нТл. Рассматриваемый период по ряду параметров (сила возмущенности Солнца, солнечного ветра и магнитосферы) уступает аналогичному периоду 2003 года, приведенные данные свидетельствует о том, что благодаря событиям осени 2003 и 2004 гг. фаза спада 23-го цикла солнечной активности является одной из самых активных за весь период всесторонних исследований солнечно-земных связей.

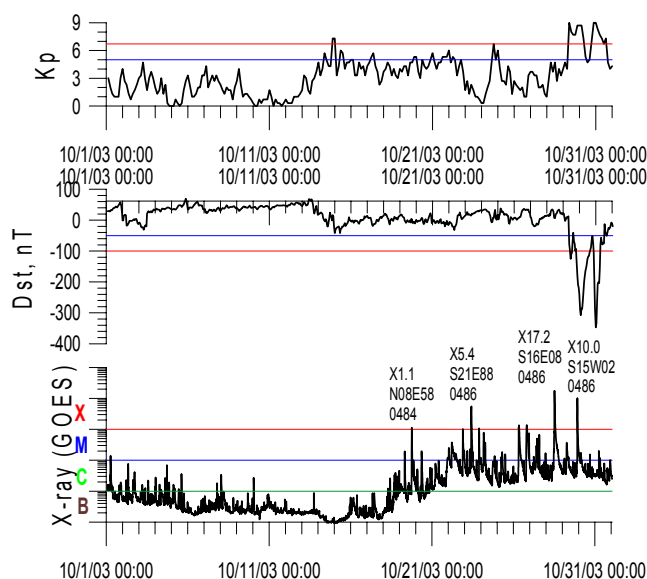


Рис. 8а. Последовательность солнечных и наземных измерений в октябре 2003 г.

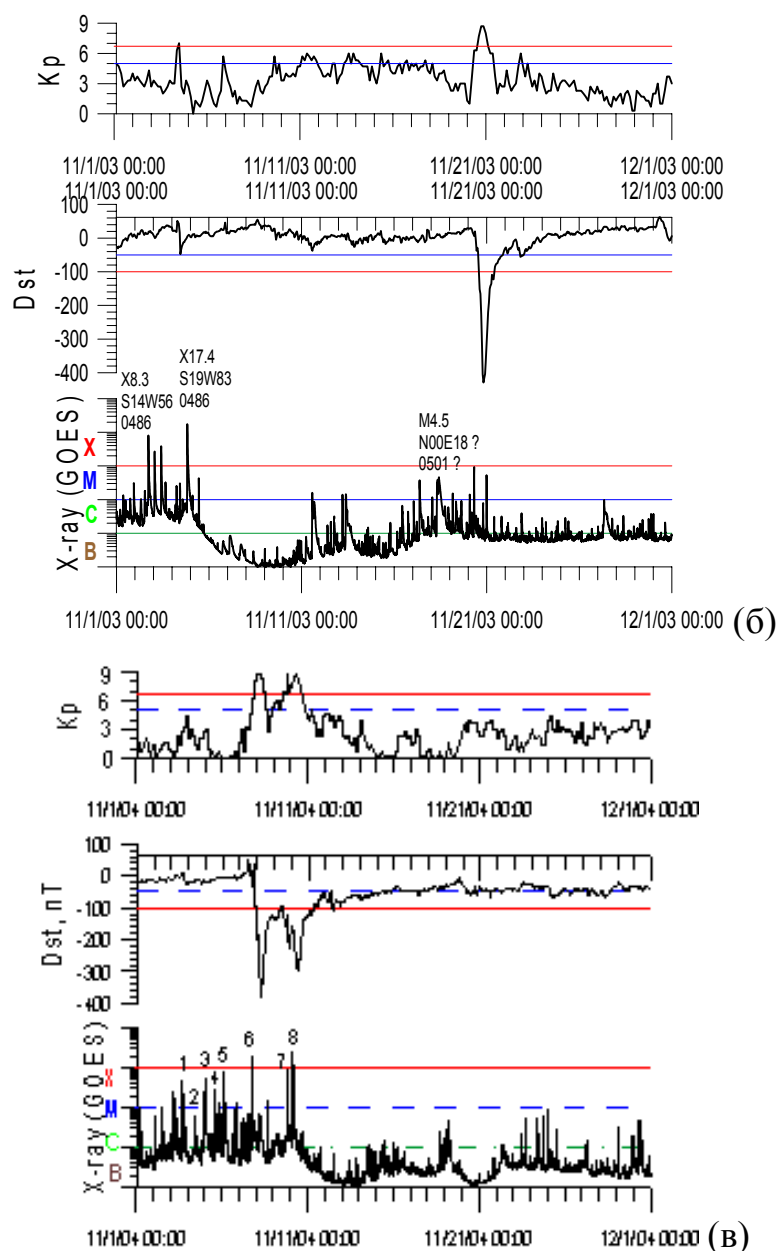


Рис. 8. Последовательность солнечных и наземных измерений в ноябре 2003 г. (б) и октябре 2004 г. (в); верхняя и средняя панели: Kp- и Dst-индексы (синие и красные линии указывают границы умеренных и сильных магнитных бурь)

3.4.2.6. Зависимость оттока ионосферных ионов кислорода в полярной шапке от интенсивности полярного дождя

На основе данных приборов ГИПЕРБОЛОИД и ИОН спутника ИНТЕРБОЛ-2 в полярной шапке на высотах ~ 20000 км было проведено сравнение потоков восходящих ионосферных ионов (полярный ветер) со слабыми потоками электронов (полярный дождь).

В исследовании была предпринята попытка исключить из исследования потоки ионосферных ионов получившие дополнительный приток энергии из магнитосферы. В результате были исключены потоки «ионного фонтана в

клефте» и потоки ионов в авроральной области, и рассматривались только потоки предположительно «чистого» полярного ветра. В летний период, когда полярная ионосфера полностью освещена, по данным прибора ГИПЕРБОЛОИД были обнаружены два различных типа восходящих потоков ионов в полярной шапке. Один тип характеризовался детектированием только холодных ионов H^+ , а второй тип характеризовался также детектированием ионов O^+ . Во втором случае потоки ионов O^+ обладали достаточной скоростью, чтобы преодолеть положительный потенциал спутника относительно окружающей плазмы. Была исследована зависимость количества случаев детектирования двух разных типов оттока ионосферной плазмы от потока электронов полярного дождя. Оказалось, что существует зависимость потока ионов O^+ в полярной шапке даже от слабых изменений интенсивности полярного дождя.

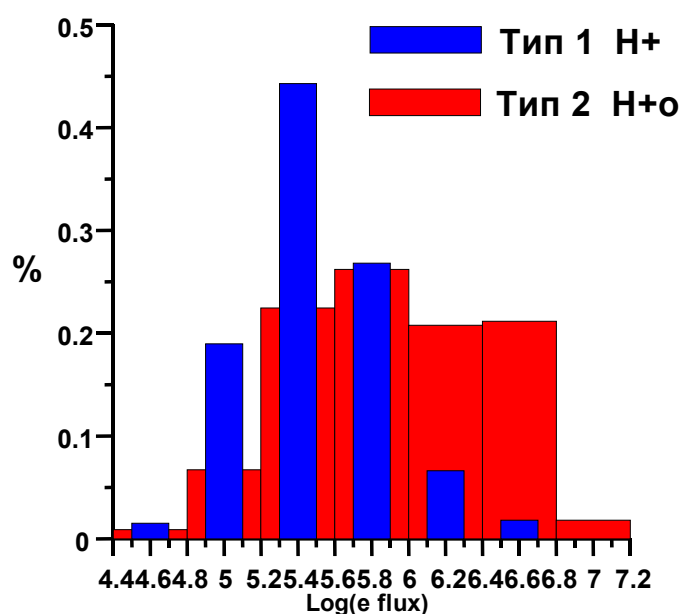


Рис. 9

На рис. 9 представлена зависимость количества случаев детектирования оттока ионосферной плазмы от потока электронов полярного дождя двух разных типов. Тип 1 (показан синим) — детектируются только потоки ионов H^+ , потоки ионов O^+ за порогом чувствительности. Тип 2 (показан красным) — детектируются как ионы H^+ , так и ионы O^+ .

3.4.2.7. Солнечные космические лучи в полярных областях гелиосферы

Проанализировано восемь случаев наблюдения солнечных космических лучей (СКЛ) в полярных областях гелиосферы и шесть случаев их наблюдения вблизи орбиты Юпитера (протоны более 30 МэВ, KET/Ulysses). Эти события легко отождествляются с хорошо известными эпизодами солнечной активности в 1992, 1997, 2000–2001 и 2003 годах и

соответствующими солнечными протонными событиями вблизи Земли (GOES) вблизи Земли. Анализируя сходства и различия этих случаев, был сделан вывод о том, что Солнце является источником космических лучей, протяженным во времени и пространстве, более сложным, чем предполагалось ранее. Временные профили интенсивности в течение первых 2-3 дней некоторых событий удивительно похожи и свидетельствуют об одинаковом усредненном процессе распространения СКЛ до удаленных точек гелиосферы. Позднее на фазе спада, когда пространственные градиенты в гелиосфере малы или отсутствуют (эффект резервуара), события различаются друг от друга, указывая на полное число частиц, инжектированных в гелиосферу, на скорость выхода частиц из резервуара и локальную модуляцию возмущениями солнечного ветра (рис. 10).

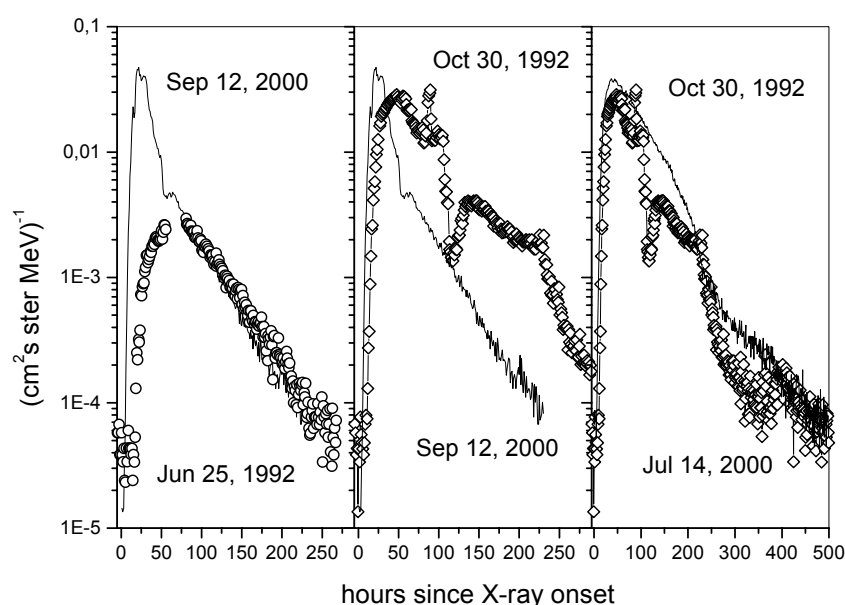


Рис. 10. Сравнение солнечных протонных событий, наблюдавшихся KET/Ulysses в полярных областях гелиосферы (14 июля и 12 сентября 2000 г.) в плоскости эклиптики на 5 а.е. (25 июня и 30 октября 1992 г.)

3.4.2.8. Ускоренные электроны в низкоширотном пограничном слое по наблюдениям на спутнике «Интербол-1»

Проведен анализ наблюдений электронов в низкоширотном пограничном слое на фланге магнитосферы по данным спутника Интербол-1. Известно, что в низкоширотном пограничном слое наблюдаются двух потоковые распределения электронов. Также известно, что электронная температура в низкоширотном пограничном слое увеличивается при уменьшении концентрации в плазме. Мы обнаружили, что скорость электронов в направлении, параллельном магнитному полю, в этом случае изменяется самосогласованно при изменении плотности плазмы. Именно, форма распределения электронов по скоростям не изменяется в log-log

шкале. Это показывает, что параллельные скорости электронов уменьшаются в обратной пропорции по отношению к плотности плазмы в низкоширотном пограничном слое. Это указывает на возможную роль механизма Ферми как ускорительного механизма. Дополнительно это показывает, что магнитные силовые линии в пограничном слое являются замкнутыми (рис. 11).

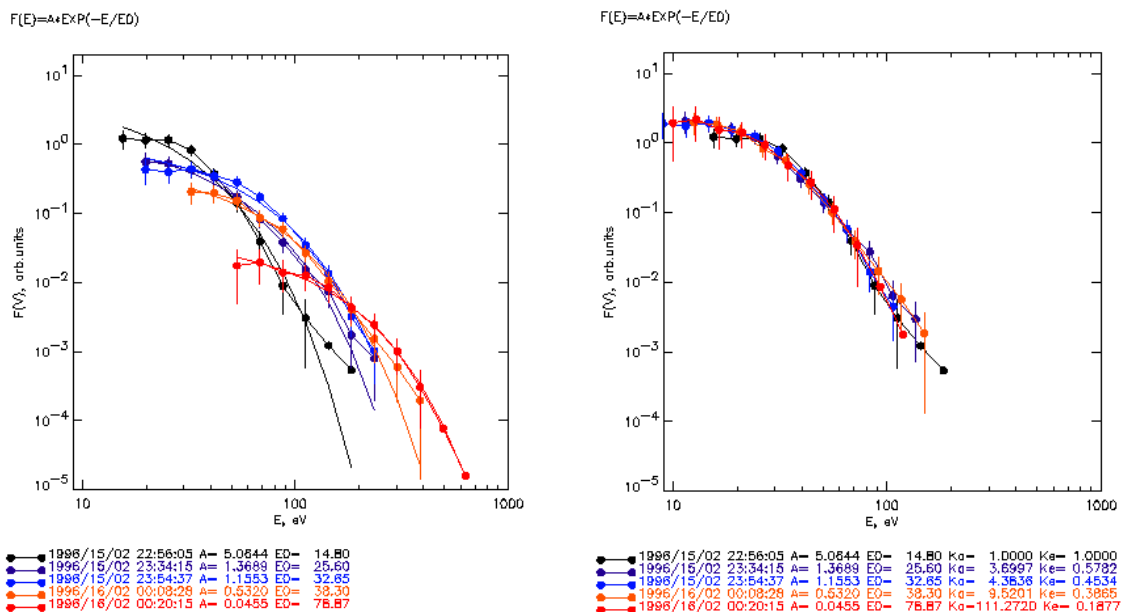


Рис. 11. Результаты измерений спектров электронов в низкоширотном погранслое магнитосферы Земли на спутнике «Интербол-1» (слева) и их аппроксимации (справа)

3.4.2.9. Исследование солнечного ветра

Изучена изменчивость солнечного ветра в диапазоне частот $10^{-3} \dots 1$ Гц. На большой статистике получены гистограммы распределений по амплитуде значений потока ионов солнечного ветра и модуля межпланетного магнитного поля и их относительных среднеквадратичных отклонений от среднего по данным приборов спутника «Интербол-1» в области довольно высоких частот, ранее не изучавшейся систематически. На основе анализа этих измерений показано, что, в среднем, относительные вариации и потока ионов, и модуля межпланетного магнитного поля составляют около 10 % для низких частот ($10^{-3} \dots 10^{-2}$ Гц) и, соответственно, около 3 % для более высоких частот ($10^{-2} \dots 1$ Гц). Эти результаты в части статистики по вариациям магнитного поля сопоставлены с результатами аналогичного анализа данных спутника Кластер и получено довольно хорошее их соответствие. Из этих же данных получено соотношение между уровнем вариаций плазмы и магнитного поля в областях невозмущенного солнечного ветра, форшока и магнитослоя. Как для низких, так и для высоких частот амплитуда вариаций в форшоке и магнитослое значительно выше (в среднем, примерно в три раза), чем в невозмущенном солнечном ветре.