

2. РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ИНСТИТУТАХ В 2006–2007 ГОДАХ

2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАВЕРШЕННЫХ ЛЕТНЫХ НАУЧНЫХ ПРОГРАММ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАБЛЮДЕНИЙ

2.1.1. ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

2.1.1.1. Астрофизика высоких энергий

1. Статистические свойства локальной популяции активных галактик и природа космического рентгеновского фона по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ

Принято считать, что космический рентгеновский фон является суммарным излучением миллионов активных ядер галактик (АЯГ) и поэтому представляет собой уникальную запись истории роста сверхмассивных черных дыр. Ученые Отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований РАН выполнили критическую проверку этой гипотезы с помощью обсерватории ИНТЕГРАЛ. Во-первых, используя российскую квоту наблюдательного времени обсерватории, была построена карта всего неба в диапазоне энергий 17–60 кэВ. В результате были обнаружены и отождествлены более 130 источников в ядрах близких галактик. На карте распределения АЯГ, зарегистрированных обсерваторией ИНТЕГРАЛ, четко прослеживается крупномасштабная структура локальной Вселенной, состоящей из сгущений галактик и пустот с характерными размерами в десятки миллионов световых лет. Во-вторых, была выполнена уникальная программа наблюдений земного диска обсерваторией ИНТЕГРАЛ с целью измерения потока рентгеновского фонового излучения в широком диапазоне энергий 3–150 кэВ. При этом Земля использовалась как экран, закрывающий от нас излучение далеких источников, составляющих фон. В итоге было показано, что измеренный поток космического рентгеновского фона и исследованные статистические свойства локальной популяции АЯГ согласуются с гипотезой о том, что жесткий рентгеновский фон представляет собой суммарное излучение АЯГ. Кроме того, были получены жесткие ограничения на эволюцию АЯГ, начиная с ранних эпох Вселенной (на красных смещениях $z \sim 1,5$) по настоящее время ($z = 0$).

В ядрах большинства галактик находятся черные дыры с массой от миллионов до миллиардов масс Солнца. Во время аккреционного роста такие объекты могут наблюдаться как сейфертовские галактики или квазары. Считается, что активные ядра галактик (АЯГ) вносят основной вклад в космический рентгеновский фон — излучение, пронизывающее космическое пространство вокруг нас. В стандартном рентгеновском диапазоне (на

энергиях ниже 10 кэВ) глубокие обзоры, выполненные с помощью телескопов ХММ им. Ньютона и Chandra, позволили разрешить около 80 % фона на отдельные АЯГ. Однако остается доказать (или опровергнуть), что жесткий рентгеновский фон на энергиях выше 10 кэВ также состоит из излучения АЯГ. Так как чувствительность современных жестких рентгеновских детекторов уступает на несколько порядков чувствительности телескопов, работающих в стандартном рентгеновском диапазоне, была поставлена цель выяснить природу жесткого рентгеновского фона по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ, не пытаясь разрешить фон на отдельные источники.

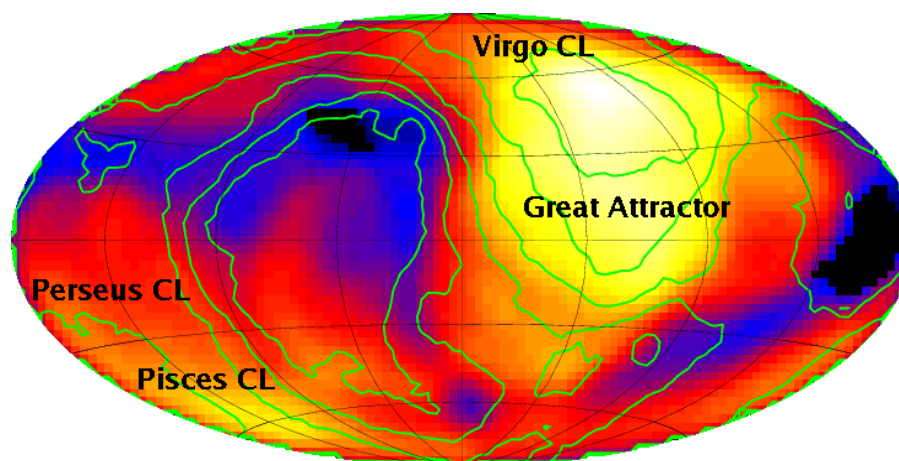


Рис. 1. Пространственная плотность АЯГ в различных участках неба. Максимальная плотность достигается в направлении на скопление галактик в созвездии Дева

Во-первых, используя российскую квоту наблюдательного времени обсерватории, была построена карта всего неба в диапазоне энергий 17–60 кэВ. В результате были обнаружены и отождествлены более 130 источников в ядрах близких галактик. Больше половины полученной выборки составили АЯГ второго типа, которые характеризуются значительным поглощением рентгеновского излучения вдоль луча зрения и не могут быть обнаружены в мягких рентгеновских обзорах. В результате была впервые построена функция жесткой рентгеновской светимости близких АЯГ и показано, что доля АЯГ второго типа падает с увеличением светимости от 70 до 25 %. На карте распределения АЯГ, зарегистрированных обсерваторией ИНТЕГРАЛ, четко прослеживается крупномасштабная структура локальной Вселенной, состоящей из сгущений галактик и пустот с характерными размерами в десятки миллионов световых лет.

Во-вторых, была выполнена уникальная программа наблюдений земного диска обсерваторией ИНТЕГРАЛ с целью измерения потока рентгеновского фонового излучения в широком диапазоне энергий 3–150 кэВ. При этом Земля использовалась как экран, закрывающий от нас излучение далеких источников, составляющих фон. Эта задача оказалось нетривиальной, так как Земля сама является источником жесткого рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии космических

лучей с атмосферой Земли. Поэтому для оценки вклада этого излучения в наблюдаемый сигнал были проведены вычисления методом Монте-Карло. В результате удалось уточнить значение потока космического рентгеновского фона по сравнению с предыдущими измерениями.

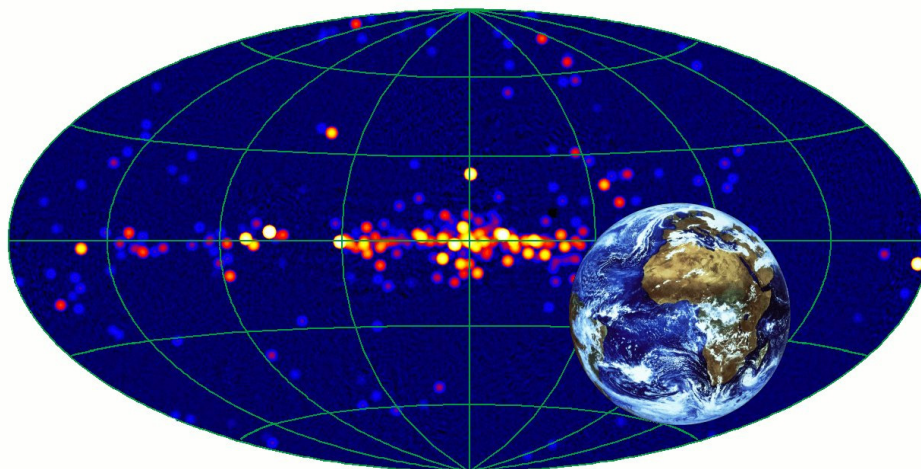


Рис. 2. Карта неба в диапазоне энергий 17–60 кэВ, полученная по данным первых четырех лет наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ, на которую наложено изображение Земли по данным спутника METEOSAT. Благодаря тому, что диск Земли экранирует от нас излучение далеких источников, можно измерить полную интенсивность космического рентгеновского фона, составленного из множества таких источников

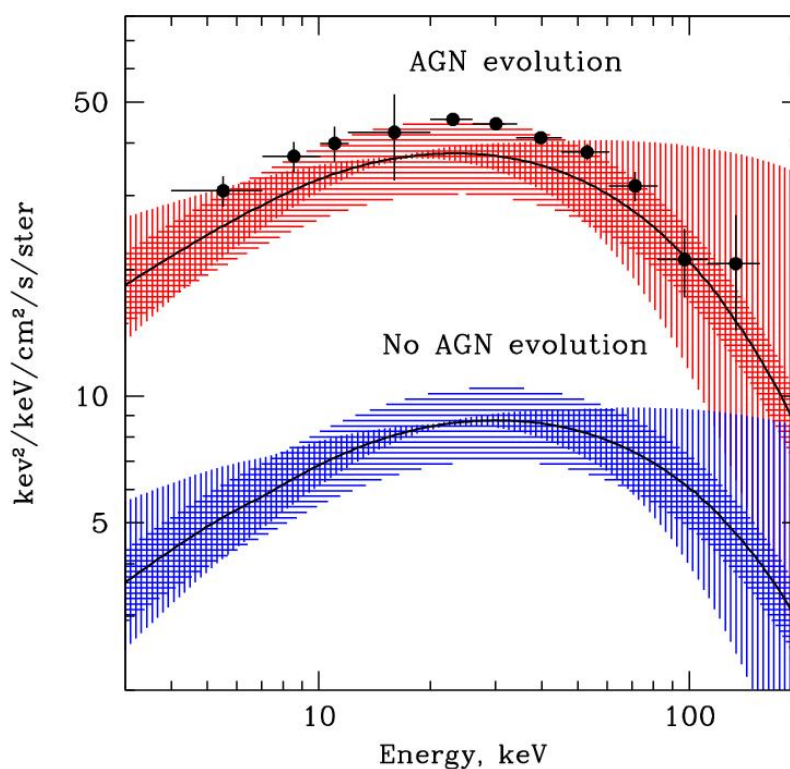


Рис. 3. Сравнение спектра космического рентгеновского фона, измеренного ИНТЕГРАЛ с модельными предсказаниями, основанными на измеренном суммарном спектре локальных АЯГ: при учете эволюции плотности излучения АЯГ с красным смещением, обнаруженной по данным CHANDRA и XMM-Newton (вверху) и без такого учета (внизу)

Наконец, было показано, что измеренный поток космического рентгеновского фона и исследованные статистические свойства локальной популяции АЯГ согласуются с гипотезой о том, что жесткий рентгеновский фон представляет собой суммарное излучение АЯГ. Более того, были получены ограничения на эволюцию АЯГ, начиная с ранних эпох Вселенной (на красных смещениях $z \sim 1,5$) по настоящее время ($z = 0$). Выяснилось, что по мере того, как популяция АЯГ эволюционировала в сторону уменьшения светимости (от мощных квазаров к более слабым сейфертовским галактикам), такие ключевые свойства, как соотношение АЯГ первого и второго типа и форма жесткого рентгеновского спектра АЯГ, по всей видимости, практически не менялись.

2. Суммарное рентгеновское излучение звездного населения галактик

Происхождение фонового рентгеновского излучения нашей Галактики было загадкой для рентгеновской астрономии более 25 лет. Спектральные свойства этого излучения указывали на то, что излучение формируется в горячей ($>5\text{--}10$ кэВ) плазме, однако никому не удавалось объяснить механизм диффузного нагрева межзвездного вещества до таких температур и, в особенности, механизм удержания такой горячей плазмы в слабом гравитационном поле нашей Галактики. Удалось привести ряд убедительных аргументов в пользу того, что фоновое рентгеновское излучение Галактики является суммарным излучением большого числа слабых рентгеновских источников звездного типа (в частности - аккрецирующих белых карликов и коронально активных звезд рис. 4, 5). В 2007 г. нам удалось значительно продвинуться в понимании природы формирования фонового излучения нашей Галактики как в рентгеновском так и в жестком рентгеновском/мягком гамма диапазонах, а также продемонстрировать, что суммарное излучение слабых рентгеновских источников вносит основной вклад в протяженное излучение большого числа других галактик.

В частности:

1. Анализ большого набора данных наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ, обладающей уникальной комбинацией эффективного телесного угла поля зрения и углового разрешения, впервые позволил показать, что жесткое рентгеновское/мягкое гамма излучение нашей Галактики после вычета вклада ярких аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд формируется в результате суммарного излучения аккрецирующих белых карликов. Форма энергетического спектра Галактики позволила оценить среднюю по Галактике массу аккрецирующих белых карликов — 0,5–0,6 солнечных массы.

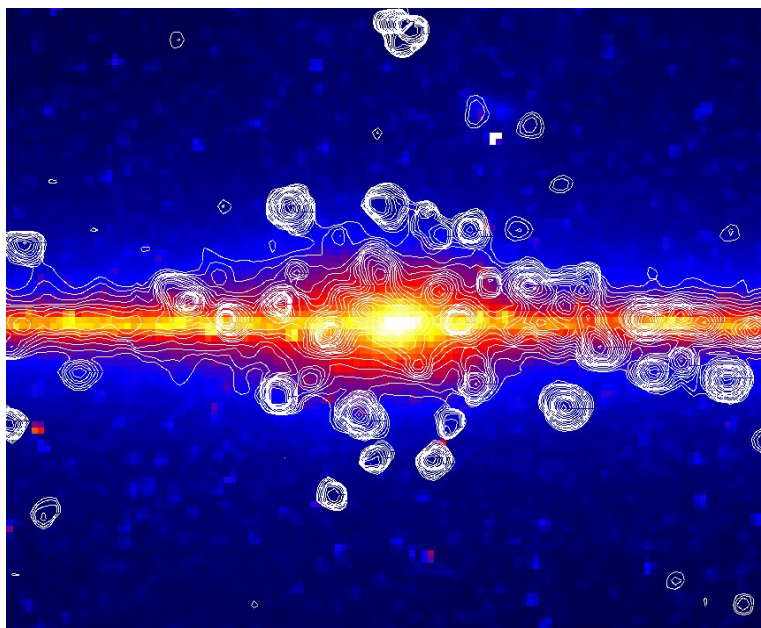


Рис. 4. Точное соответствие между рентгеновским изображением, полученным Rossi XTE (контуры) и ближним инфракрасным изображением со спутника COBE (цветное) дает основания предполагать, что интенсивность рентгеновского излучения следует распределению звездной массы в Галактике и что рентгеновский галактический фон генерируется точечными слабыми источниками

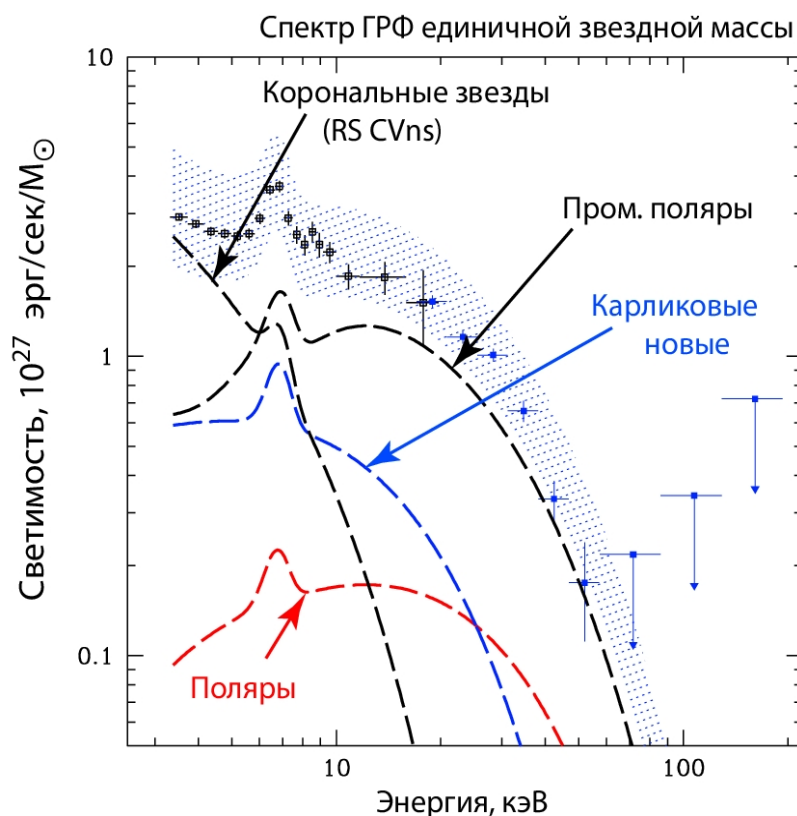


Рис. 5. Широкополосный спектр суммарного излучения слабых рентгеновских источников в нашей Галактике и вклад в него излучения различных классов источников. Форма экспоненциального завала спектра в жестком рентгеновском диапазоне, измеренная при помощи наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ, позволила определить среднюю массу аккрецирующих белых карликов в нашей Галактике

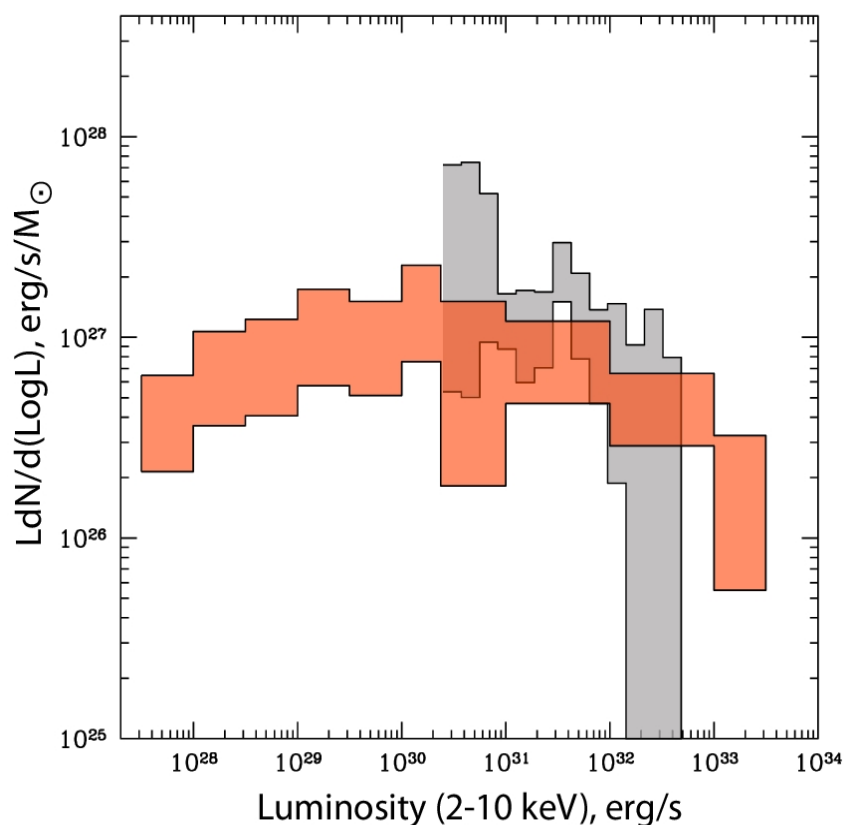


Рис. 6. Функция светимости слабых рентгеновских источников, измеренных обсерваторией CHANDRA в области центра Галактики (серая область) и сравнение ее с функцией светимости слабых рентгеновских источников в окрестности Солнца (красная область). Хорошо видно, что популяция слабых рентгеновских источников в области центра Галактики в окрестностях Солнца практически одинаковы

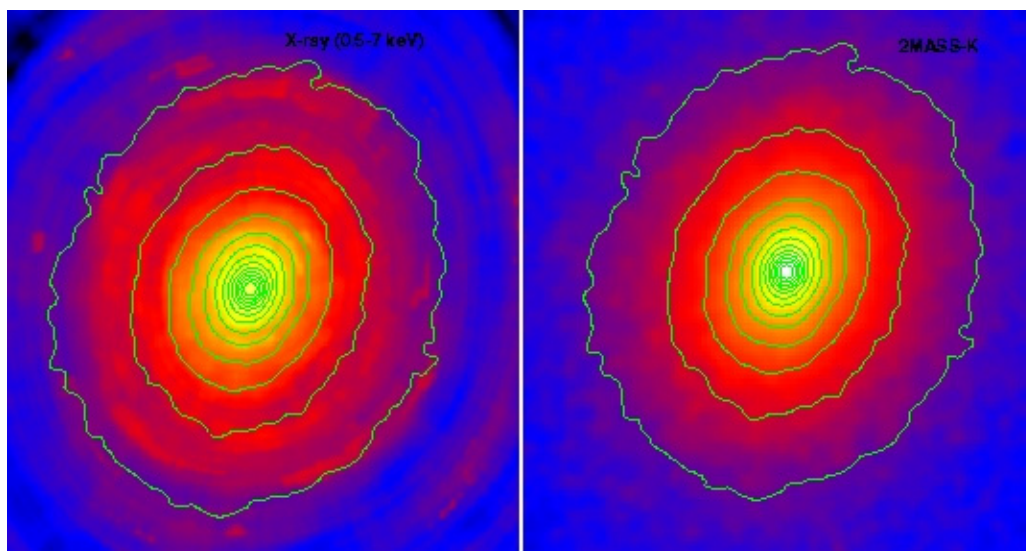


Рис. 7. Изображение близкой эллиптической галактики M32 в рентгеновском диапазоне (слева) и его сравнение с картой галактики в инфракрасном спектральном диапазоне (справа). Детальные исследования показали, что наблюдаемое протяженное рентгеновское излучение этой галактики рождается в результате суммарной светимости слабых рентгеновских источников — аккрецирующих белых карликов и коронально активных звезд

2. С использованием глубоких наблюдений областей Центра Галактики и галактической плоскости показано, что как минимум 50 % наблюдаемого «фоновое» рентгеновское излучение Галактики возникает в результате сложения потоков большого количества слабых рентгеновских звезд — звезд с активными коронами и аккрецирующих белых карликов. Продemonстрировано, что функция светимости слабых галактических источников в расчете на единицу звездной массы в области Центра Галактики в пределах погрешностей совпадает с функцией светимости галактических источников, построенной нами в окрестностях Солнца.

3. Исследования протяженного рентгеновского излучения близкой карликовой эллиптической галактики M32 показали, что основная часть ее излучения в области энергий 0,5–7 кэВ возникает в результате суммарного излучения рентгеновских звезд и аккрецирующих белых карликов.

3. Рентгеновские двойные, история звездообразования и спиральная структура галактик

Массивные рентгеновские двойные — молодые объекты, тесно связанные с процессом звездообразования. Действительно, наблюдения обсерваторий Chandra и XMM-Newton обнаружили линейную связь между их числом и современным темпом звездообразования в галактиках. Однако при более детальном рассмотрении с точки зрения теории эволюции двойных систем становится очевидным, что популяция массивных рентгеновских двойных должна зависеть не только от его сегодняшнего значения, но и от истории звездообразования в галактике за предыдущие ~10–100 млн лет.

Ближайшие соседи нашей Галактики — Магеллановы Облака представляют уникальную возможность подробно исследовать эту проблему, определив зависимость числа двойных от времени, прошедшего с момента звездообразования. С этой целью на основе оптических наблюдений Малого Магелланова Облака была построена пространственно-разрешенная история звездообразования в этой галактике за предыдущие 100 млн лет. Сравнение с пространственным распределением массивных рентгеновских двойных, полученным из наблюдений обсерватории XMM-Newton, позволило определить искомую зависимость (рис. 8). Оказалось, что популяция массивных рентгеновских двойных достигает своего максимума через ~20–50 млн лет после вспышки звездообразования, затем быстро уменьшается. С другой стороны, число объектов моложе 10 млн лет также невелико, что указывает на относительно малый вклад систем с черными дырами и с донорами-сверхгигантами. Полученная зависимость не только открывает широкие возможности для проверки и калибровки теории эволюции двойных систем, но и позволяет более точно обосновать возможность использования массивных рентгеновских двойных в качестве индикатора звездообразования в галактиках. Она также позволяет предсказать ряд интересных эффектов, поддающихся прямой экспериментальной проверке.

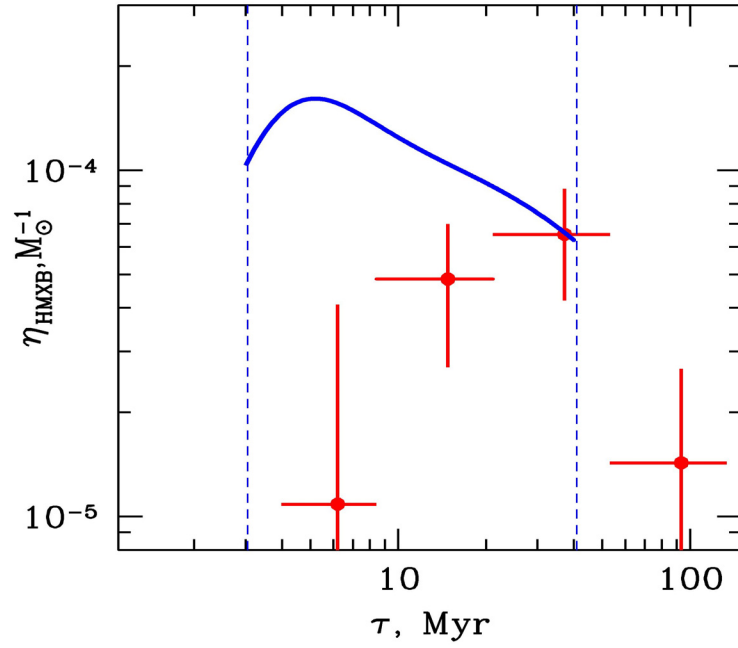


Рис. 8. Зависимость числа массивных рентгеновских двойных от времени, прошедшего с момента звездообразования, полученная по данным рентгеновских (XMM-Newton) и оптических наблюдений Малого Магелланова Облака. Сплошной линией показано поведение темпа вспышек Сверхновых второго типа, вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты образования первой черной дыры (~3 млн лет) и последней нейтронной звезды (~40 млн лет)

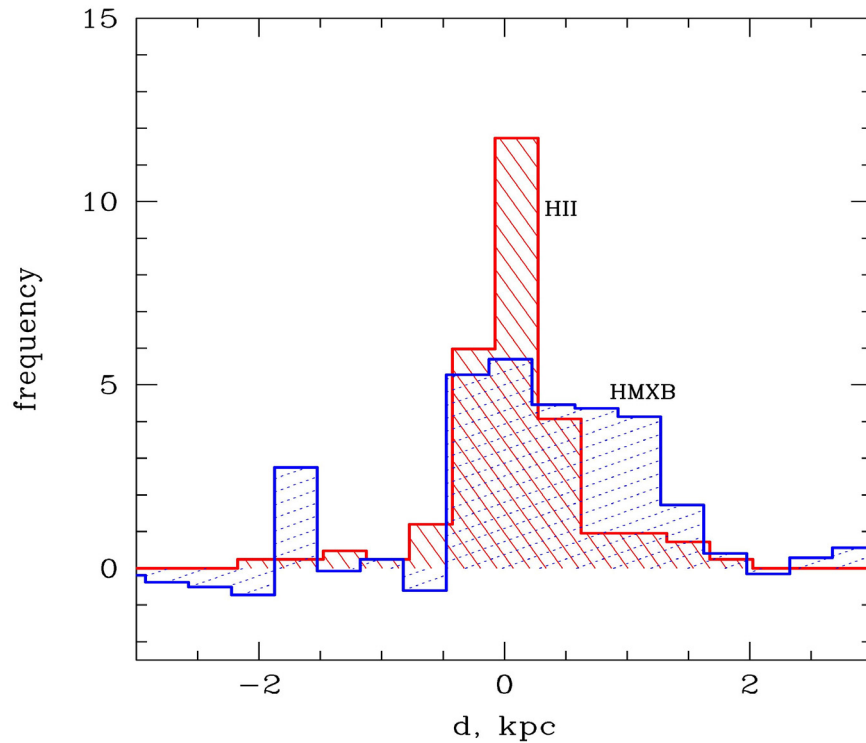


Рис. 9. Распределение расстояний до ближайшего спирального рукава для массивных рентгеновских двойных («HMXB») и областей ионизованного водорода («HII»). Правое крыло ассиметричного распределения двойных ориентировано в направлении «downstream» и связано с конечным временем их эволюции

Одно из таких предсказаний касается особенностей проявления спиральной структуры галактик в рентгеновском диапазоне. Конечное время жизни массивных рентгеновских двойных приводит к их смещению относительно спиральной структуры, наблюдаемой в классических индикаторах звездообразования, таких как H α -линия водорода. Построена кинематическая модель, описывающая этот процесс и показано, что он будет проявляться по-разному для систем разной светимости и с разной природой компактного объекта и оптического компаньона. Этот эффект может также быть использован для исследования кинематики спиральной структуры, в частности для определения ее точки коротации. Предсказания модели сравниваются с результатами наблюдений галактики M51 обсерваторией Chandra (рис. 9). Также предсказано распределение массивных рентгеновских двойных по галактической долготе в нашей Галактике, позволяющее объяснить результаты наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ.

4. Рентгеновский обзор скоплений галактик площадью 400 кв. град: каталог и статистическая калибровка

Составлен каталог скоплений галактик, которые были обнаружены в новом обзоре, основанном на данных наведений телескопа ROSAT. Обзор оптимизирован для исследования массивных скоплений ($T > 5$ кэВ) на высоких красных смещениях. Он покрывает 397 кв. град и основан на 1610 высокоширотных наведениях телескопа ROSAT — это практически все данные наведений ROSAT, пригодные для поиска далеких скоплений.

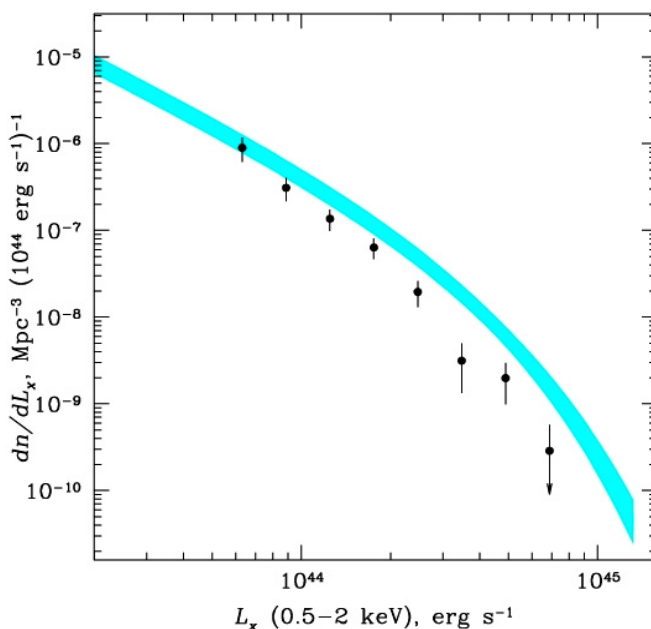


Рис. 10. Рентгеновские функции светимости далеких скоплений галактик на $z > 0,3$ по данным обзора 400d (точки) и скоплений в местной части Вселенной по данным каталогов на основе обзора всего неба ROSAT (широкая полоса). Хорошо видна космологическая эволюция функции светимости скоплений

Это самый большой обзор далеких скоплений, который может быть получен, используя рентгеновские данные, накопленные к настоящему времени всеми рентгеновскими обсерваториями. Поисковый объем обзора для скоплений большой рентгеновской светимости на $z < 1$ превышает объем всей местной части Вселенной на $z < 0,1$. В обзоре обнаружено 287 протяженных рентгеновских источников с рентгеновскими потоками $f > 1,4 \cdot 10^{-13}$ эрг·с⁻¹·см⁻² в диапазоне 0,5–2 кэВ, из которых 266 (93 %) были отождествлены в оптическом диапазоне как скопления или группы галактик, или отдельные эллиптические галактики. Обзор хорошо откалиброван статистически при помощи моделирования методом Монте-Карло. Показано, что подсчеты скоплений хорошо согласуются с результатами предыдущих обзоров меньшей площади. Наша выборка статистически достоверно показывает космологическую эволюцию функции светимости скоплений — плотность числа скоплений наибольшей светимости заметно уменьшается уже на $z > 0,3$.

Для выборки из 40 наиболее далеких и массивных скоплений из нашего каталога были проведены глубокие наблюдения в рентгеновском диапазоне при помощи телескопа Чандра. Эти данные позволят получить новые ограничения на уравнение состояния темной энергии.

5. Оптические отождествления жестких рентгеновских источников обсерваторий ИНТЕГРАЛ, СВИФТ и RXTE

Начата кампания по проведению оптических отождествлений рентгеновских источников, обнаруженных в обзорах всего неба обсерваторий RXTE, ИНТЕГРАЛ и СВИФТ. Двенадцать исследованных источников оказались неизвестными ранее близкими активными ядрами галактик ($z < 0,1$). Спектрофотометрические исследования этих источников в оптическом диапазоне были проведены на Российско-турецком 1,5-м телескопе (РТТ150). Измерены их красные смещения и параметры основных эмиссионных линий.

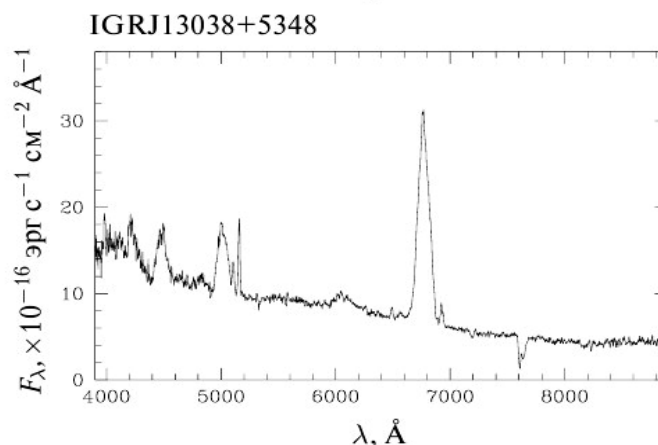
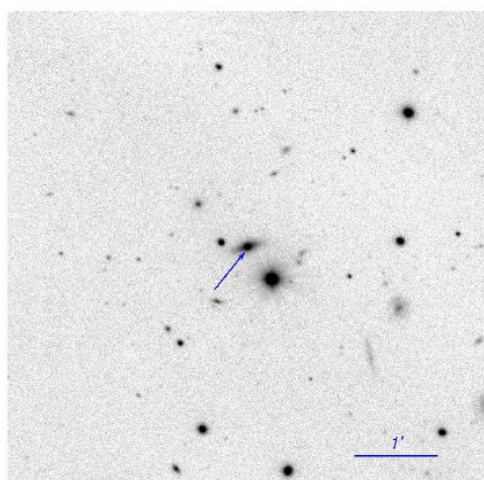


Рис. 11. Оптическая идентификация жесткого рентгеновского источника IGRJ13038+5348 как Сейфертовской галактики первого типа

Используя результаты наблюдений телескопа РТТ-150 и открытые данные орбитальной обсерватории SWIFT, показано, что источники XSS,J00564+4548 и IGR,J00234+6141, по всей видимости, являются промежуточными полярами, т. е. двойными системами с аккрецирующими белыми карликами имеющими не очень сильное магнитное поле (>10 МГс). Обнаружены периодические пульсации оптического излучения с периодами ~ 480 и ~ 570 с, которые скорее всего соответствуют периодам вращения белых карликов в этих системах. Дальнейшее исследование этих систем при помощи телескопа РТТ-150 позволит более подробно изучить их параметры.

6. Наблюдения оптических послесвечений космических гамма-всплесков

В течение 2006 г. на телескопе РТТ-150 проведены наблюдения оптических послесвечений 12 гамма-всплесков. Получены важные точки в кривых блеска этих послесвечений, которые были использованы при построении общих кривых блеска послесвечений и сравнении их с теоретическими моделями. По результатам наблюдений опубликовано 16 циркуляров GCN.

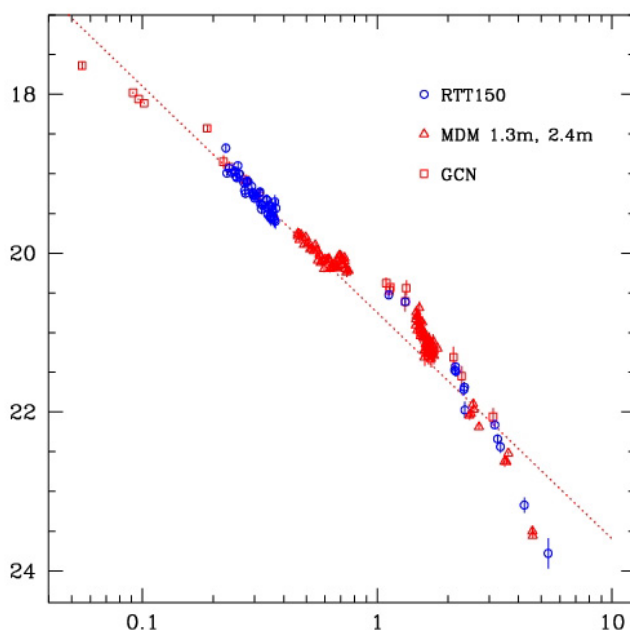


Рис. 12. Оптическая кривая блеска послесвечения гамма-всплеска GRB 060526

7. Расчет спектров излучения космологической рекомбинации с учетом двухфотонных процессов

Рассчитан спектр излучения космологической рекомбинации с учетом двухфотонных каскадных процессов. Прогресс современных компьютеров позволил впервые выполнить точные расчеты этого процесса и реализовать идеи, высказанные в пионерских работах Зельдовича, Сюняева и Дубровича. Сегодня несколько групп обдумывает постановку экспериментов по исследованию возникающих линий в спектре реликтового излучения.

Примерно через 260 тыс. лет после Большого взрыва космическая плазма остыла до такой степени, что стало возможным существование нейтральных атомов водорода. К тому времени температура изотропного чернотельного реликтового излучения Вселенной опустилась до 3800 К. Процесс рекомбинации связан с испусканием нескольких фотонов при переходе электронов с верхних уровней атома водорода на основной. Уже в течение 40 лет известно, что физика космологической рекомбинации очень необычна. Это, во-первых, связано с тем, что в медленно расширяющейся Вселенной выход фотонов из резонансного перехода Лайман-альфа оказывается затруднен, благодаря чему сильно возрастает роль двухфотонного распада метастабильного уровня 2s. Во-вторых, из-за огромного преобладания фотонов над протонами заселенность уровней атома водорода полностью определяется скоростями излучательных процессов.

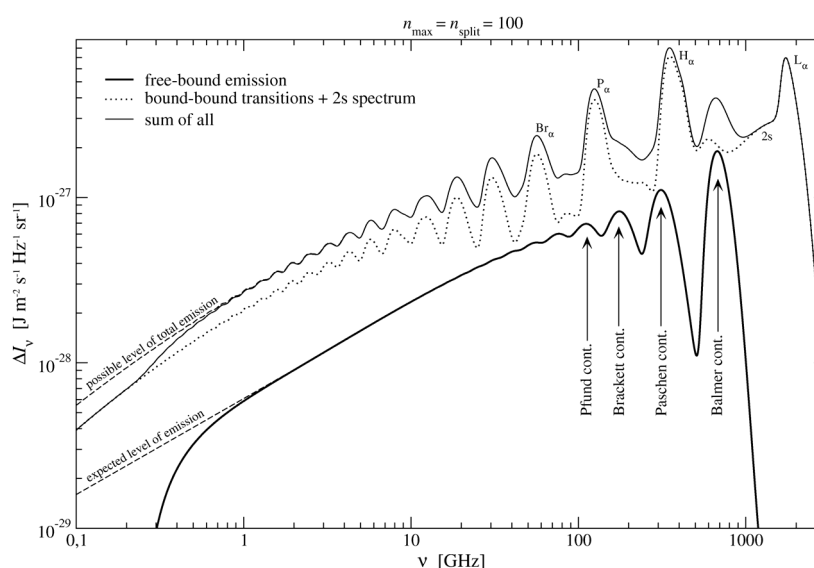


Рис. 13. Спектр рекомбинации водорода – 5 фотонов на один рекомбинирующий электрон

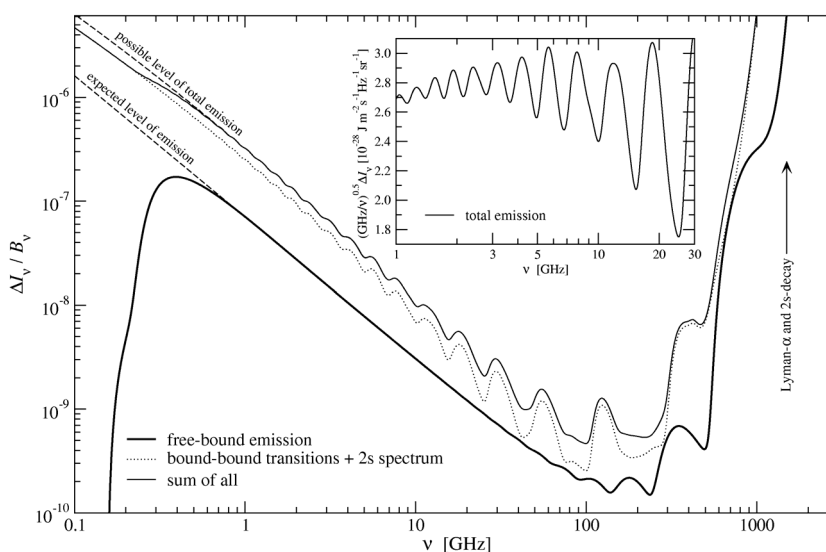


Рис. 14. Спектр рекомбинации водорода в относительных единицах. На врезке показана квазипериодическая структура сигнала в сантиметровом и дециметровом диапазоне

В данной работе были впервые выполнены детальные вычисления спектра рекомбинационного излучения, возникающего при всех возможных переходах с уровней атома водорода вплоть до 100-го, с учетом таких процессов (в дополнение к основным), как вынужденный двухфотонный распад уровня $2s$ атома водорода, двухфотонный распад высоковозбужденных уровней и другие.

Из-за расширения Вселенной рекомбинационное излучение смещается в красную сторону спектра более чем в 1000 раз, в результате чего фотоны, испущенные в ультрафиолетовом диапазоне, приходят к нам уже в субмиллиметровом диапазоне спектра. В результате переходов между высоковозбужденными уровнями к нам должны приходить и фотоны в радиодиапазоне, там, где экспериментальные установки для наблюдения реликтового фона уже достигли потрясающей чувствительности. В настоящее время разрабатываются телескопы, которые позволяют фиксировать флуктуации микроволнового фона на уровне 10 нК. Такая чувствительность достаточна для измерения связанных с рекомбинации спектральных искажений фона, ожидаемая амплитуда которых составляет 50–100 нК. Такие измерения позволяют точно измерить температуру микроволнового фона и энтропию Вселенной, а также восстановить в подробностях картину того, как Вселенная становилась прозрачной.

Кроме того, были рассчитаны релятивистские поправки к темпу двойного комптоновского рассеяния, связанные с высокой температурой плазмы. Оценено их влияние на процесс термолизации спектральных искажений мю-типа реликтового фона, возникающих в дорекомбинационную эпоху Вселенной. Показано, что релятивистские эффекты оказывают влияние на уровне нескольких процентов и, возможно, потребуют учета при интерпретации данных наблюдений будущих экспериментов.

2.1.1.2. Физика космической плазмы, энергичных частиц, Солнца и солнечно- земных связей

1. Ускорение частиц во время солнечных вспышек

Во время мощных протонных вспышек 2003–2006 гг. получены свидетельства длительного и многократного ускорения частиц на Солнце. В моменты солнечных вспышек антисовпадательная защита спектрометра INTEGRAL (ACS SPI), которая чувствительна к первичным и вторичным гамма-квантам >150 keV, регистрирует преимущественно солнечные гамма-кванты. Примерно первые 30 мин после выхода в межпланетное пространство солнечные протоны с энергией более 80 МэВ распространялись без рассеяния до Земли и временные профили их интенсивности определялись только временным профилем источника на Солнце и его энергетическим спектром. Функция инжекции протонов 80–165 МэВ была отлична от нуля, начиная с 06:43:80 UT, и могла быть представлена в виде произведения темпа счета ACS SPI (временная часть) и степенного спектра

протонов $\sim E^{-4,7 \pm 0,1}$ (энергетическая часть). Протоны более высоких энергий и релятивистские электроны были инжектированы позднее, соответственно на 4 и 9 мин. Тесная взаимозависимость высокоэнергичного ЭМ излучения Солнца и потоков солнечных протонов вблизи Земли является аргументом в пользу длительного и многократного ускорения протонов в солнечных вспышках.

Были рассмотрены импульсные фазы трех мощнейших вспышек 23 цикла (28 октября 2003 г., 20 января и 7 сентября 2005 г.), которые длились ~ 20 мин и состояли, по крайней мере, из трех актов энерговыделения, различавшихся своим проявлением в мягком ($1-8 \text{ \AA}$, GOES) и жестком ($>150 \text{ кэВ}$, ИНТЕГРАЛ) рентгеновских диапазонах, а также на радиочастотах 245 МГц и 8,8 ГГц. Сделан вывод, что протоны и электроны ускорялись в каждом акте, но с различной эффективностью, причем релятивистские протоны были ускорены только после 5–6 мин развития импульсной фазы. Рекордные потоки протонов, наблюдавшиеся в гелиосфере в событии 7 сентября 2005 г., были связаны эффективным ускорением в конце импульсной фазы, которое сопровождалось потоком жесткого рентгеновского излучения, превосходившим в несколько раз аналогичные величины для двух других вспышек.

2. Многокомпонентная кинетико-континуальная модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой с учетом «неравновесности» захваченных протонов

Впервые создана уникальная многокомпонентная модель взаимодействия солнечного ветра со сверхзвуковым потоком частично ионизированной водородной плазмы локальной межзвездной среды. Эта модель учитывает неравновесность «захваченных» протонов солнечного ветра, образованных ионизацией атомов H, проникающих из межзвездной среды. При этом «захваченные» протоны имеют температуру, существенно превосходящую температуру первичных солнечных протонов. Новая модель является обобщением модели Баранова и Маламы (1993), в которой предполагалась мгновенная релаксация протонов. В новой модели не только атомы водорода, но и «захваченные» протоны описываются в рамках кинетической теории.

В рамках новой модели показано: (1) в головной области течения термодинамическая неравновесность приводит к уменьшению толщины внутреннего интерфейса (за счет увеличения гелиоцентрического расстояния до гелиосферной ударной волны на 5 а.е. и уменьшения расстояния до гелиопаузы на 12 а.е.); (2) в хвостовой части расстояние до гелиосферной ударной волны увеличивается на 70 а.е.; (3) неравновесность приводит к меньшим потокам атомов H с энергией $< 1 \text{ кэВ}$ и к большим потокам этих атомов с энергией $> 1 \text{ кэВ}$.

Проведены расчеты, в которых в качестве граничных условий для параметров солнечного ветра принимались данные, полученные на КА Wind, IPM 8. В результате были получены временные и пространственные

распределения параметров плазмы и атомов водорода в области гелиосферного интерфейса, а также внутри гелиосферы, по которым вычислялись скорости и плотности солнечного ветра вдоль траектории космического аппарата Voyager-2. Было показано хорошее совпадение теоретических расчетов с данными, полученными на КА Voyager-2 в периоды с 1984 по 1995 г. и с 1999 по 2007 г. Хорошее совпадение теоретически рассчитанной скорости солнечного ветра с данными КА Voyager-2 позволяет дать оценку концентрации межзвездных атомов водорода в окрестности гелиосферной ударной волны: $n_{H,TS} \sim 0,1 \text{ см}^{-3}$.

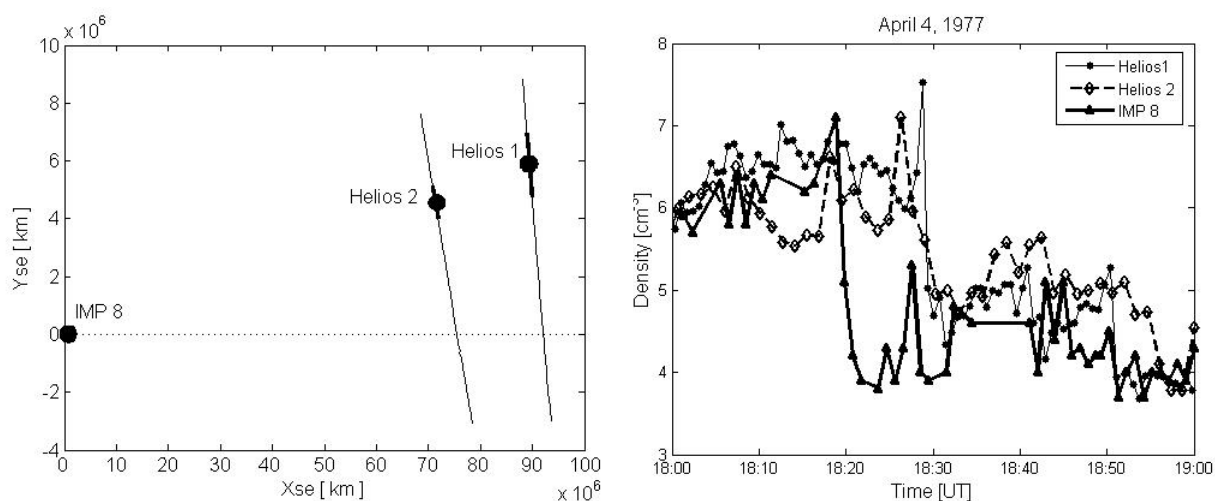
Проведено сравнение данных по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению, полученных на КА SOHO (прибор SWAN) в период с 1996 по 2005 г., с результатами, полученными теоретически. Теоретическая модель включает: а) нестационарную модель взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой б) модель переноса солнечного лайман-альфа излучения с учетом многократного рассеяния. При моделировании распределения атомов внутри гелиосферы, а также при моделировании интенсивности рассеянного излучения использовались интенсивности солнечного лайман-альфа излучения, полученные на КА SORCE (прибор SOLSTICE). В результате моделирования вычислялись спектры рассеянного солнечного лайман-альфа излучения, а также моменты от этой функции распределения — интенсивность излучения, величина доплеровского смещения спектральной линии, а также ее ширина. Показано, что существует сильное различие между теоретически и экспериментально полученными интенсивностями рассеянного солнечного лайман-альфа излучения. Характер изменения интенсивности со временем также отличается в теории и эксперименте. Вместе с тем, величины доплеровского смещения и ширины линии хорошо совпадают. Последнее означает, что полученная в модели функция распределения атомов водорода по скоростям хорошо согласуется с экспериментальными данными. Наиболее вероятная причина в расхождении между теоретическими и экспериментальными интенсивностями связана с частотой ионизации, которая используется в модели.

3. Изучение средне- и мелкомасштабных структур плотности солнечного ветра

На основе сопоставления измерений потока солнечного ветра с очень высоким временным разрешением на аппаратах «Интербол-1» и WIND установлено, что резкие границы мелкомасштабных структур плотности солнечного ветра сохраняют свою форму и длительность при распространении солнечного ветра на пути в миллион км. В продолжение проводимого систематического исследования динамики солнечного ветра при его распространении к орбите Земли установлен впервые факт сохранения формы, амплитуды и длительности резкой (короче 10 мин) границы среднемасштабной структуры плотности солнечного ветра при его

движении в течение 2,5 сут на пути в 90 млн км (0.6 а.е.) от гелиосферных зондов Helios 1, 2 до спутника Земли IMP 8.

Были получены функции распределения амплитуд флуктуаций для различных временных масштабов (от малых масштабов ~ 1 Гц и до больших масштабов $\sim 10^{-5}$ Гц) на базе измерений потока ионов солнечного ветра в 1996–1999 гг. на приборе ВДП (спутник ИНТЕРБОЛ-1) с рекордным разрешением (1 с). Детально исследовались статистические свойства этих функций распределения, такие как асимметрия (момент 3-его порядка) и эксцесс (момент 4-го порядка), отражающие соответственно степень асимметрии, а также степень выраженности хвостов функции распределения (т. е. степень «перемежаемости» среды). Показано, что на малых масштабах для временных рядов потока ионов солнечного ветра наблюдается сильная степень «перемежаемости», и она растет с уменьшением масштабов рассматриваемых вариаций. А также для интервалов солнечного ветра, содержащих резкие границы плазменных мелкомасштабных структур.



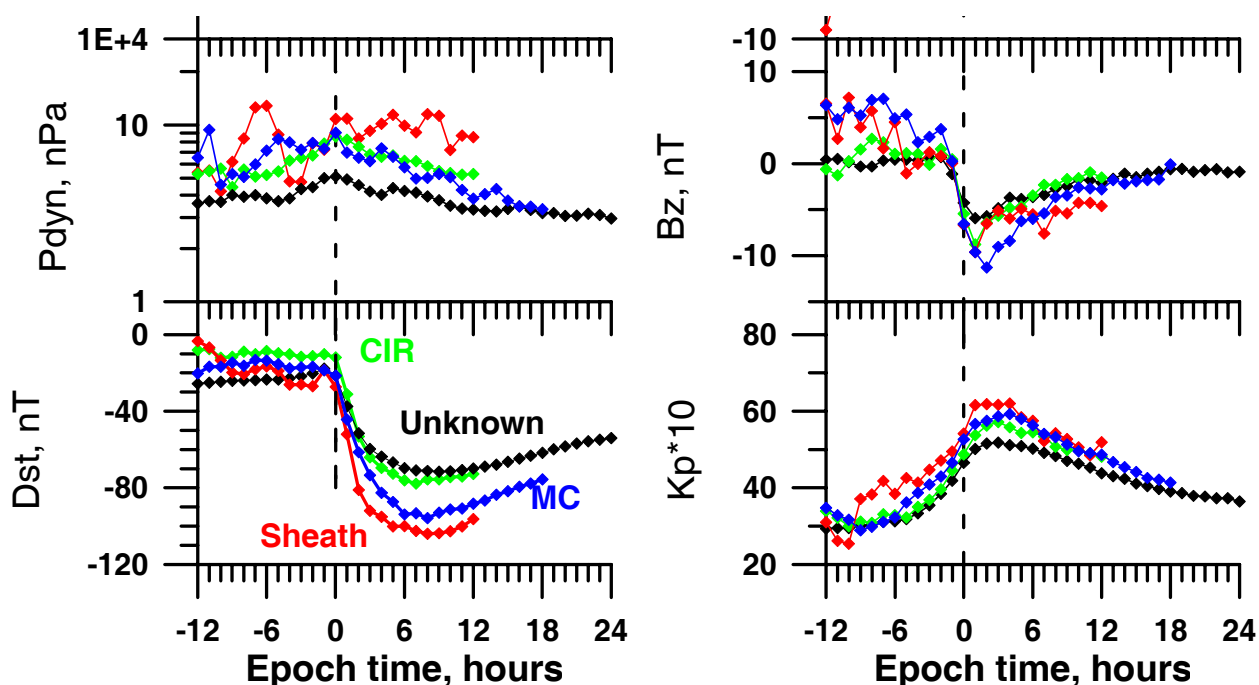
Обнаружено, что резкие границы мелкомасштабных структур плотности солнечного ветра («скачки» потока ионов) регистрируются раз в несколько дней и преимущественно группируются в области с длительностью в несколько часов, обладающие следующими свойствами: резко повышенная плотность, пониженная скорость, увеличенное межпланетное магнитное поле.

Выполнено сопоставление больших и быстрых скачков динамического давления солнечного ветра, зарегистрированных на нескольких КА, с быстрыми вариациями магнитного поля в магнитосфере, измеренными геосинхронными спутниками за период 1996–2003 гг. Показано, что при одних и тех же величинах динамического давления солнечного ветра до прихода возмущения амплитуда геосинхронного отклика пропорциональна амплитуде изменения давления солнечного ветра. При одних и тех же величинах амплитуды изменения давления солнечного ветра амплитуда геосинхронного отклика будет больше для тех событий, в которых

магнитосфера изначально была менее сжата. Результаты 3D МГД находятся в качественном и количественном согласии с экспериментальными данными.

4. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям.

Для временного интервала 1976–2001 гг. на основании базы данных OMNI были идентифицированы следующие типы течений. Квазистационарные: 1) гелиосферный токовый слой; 2) медленные течения (из корональных стримеров); 3) быстрые течения (из корональных дыр). Возмущенные: 4) сжатая плазма (на фронте быстрого и медленного течений — CIR и перед передним фронтом поршня — sheath); 5) поршень (магнитные облака — MC, и эжекты — ejecta); 6) разреженная плазма (на фронте медленного и быстрого течений СВ). Фронты разрывов: 7) прямая межпланетная ударная волна; 8) обратная межпланетная ударная волна.



Основными межпланетными источниками геомагнитных бурь являются магнитные облака (MC), которые включают само облако и область сжатия перед ним (Sheath), и области сжатия на границе быстрого и медленного потоков (CIR), содержащие южную компоненту межпланетного магнитного поля (ММП). Изучены условия в солнечном ветре раздельно для Sheath, MC и CIR, приводящие к бурям для 623 магнитных бурь в период 1976–2000 гг. Анализ проводится методом наложения эпох для 5 различных категорий бурь, возбужденных различными типами солнечного ветра: CIR (область сжатия в интерфейсе быстрого и медленного потоков — Corotating Interaction Region) — 121 буря, Sheath (область сжатия между невозмущенным солнечным ветром и телом магнитного облака) — 22, MC (магнитное облако) — 113 и «неопределенный тип» — 367, а также для «всех бурь» — 623 бури. Хотя наименьшие значения B_z компоненты ММП

наблюдаются в МС, наименьшие значения Dst индекса достигаются в Sheath. Таким образом, наибольшие магнитные бури в среднем возбуждаются во время Sheath, а не во время тела МС, возможно, за счет более высокого давления и его вариаций в Sheath. Более высокие значения параметров P_{dyn} (nkT), T/T_{exp} и β наблюдаются в CIR и Sheath и более низкие в МС, что соответствует физической сущности этих типов солнечного ветра. Возрастание вариаций (часовых дисперсий) концентрации и модуля ММП наблюдается за 5–10 ч до онсета только в течениях Sheath. Для бурь, связанных с CIR, Sheath и МС, зависимость между минимумом B_z компоненты ММП и минимумом Dst индекса и зависимость между электрическим полем E_y солнечного ветра и минимумом Dst индекса более крутые, чем для «неопределенного» типа солнечного ветра. Наиболее крутая зависимость Dst от B_z наблюдается в течениях типа Sheath, а наиболее крутая зависимость Dst от E_y наблюдается в течениях типа МС.

5. Об особенностях процессов переноса на границе магнитосферы: роль электрического поля и нелинейных магнитных барьеров

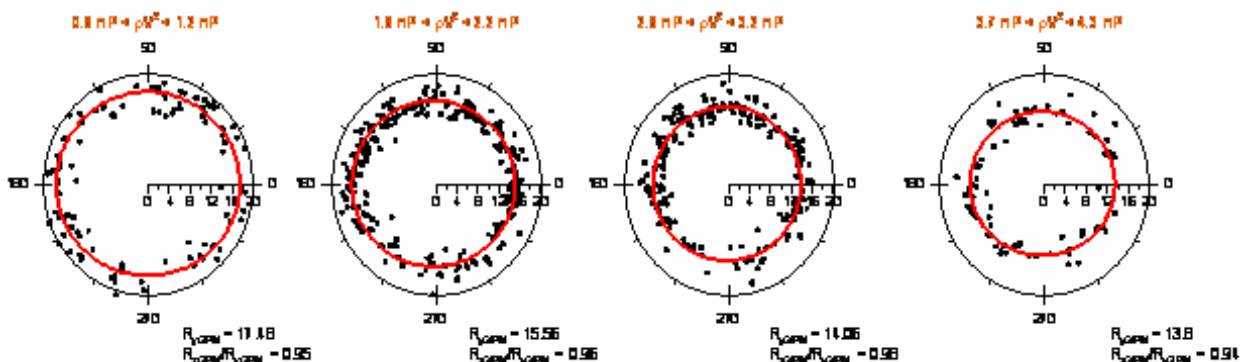
Впервые по данным четырех КА КЛАСТЕР экспериментально показана разница в измерениях потока ионов и дрейфа плазмы в скрещенных полях за счет эффекта конечного гирорадиуса протонов и продемонстрирован механизм ускорения обтекающей плазмы при инерционном дрейфе в неоднородном электрическом поле на тонкой (сравнимой с величиной гирорадиуса протона) магнитопаузе. Сравнение с аналогичными данными КА ИНТЕРБОЛ-1 показывает, что эти процессы характерны для микромасштабов на границе движущихся плазменных потоков, и открывают новый тип передачи вещества через такие границы и возможность комбинированного нагрева плазмы в неоднородном электрическом поле с наложенной магнитной турбулентностью. Например, за счет совместного действия магнитных и электрических сил внутри токового слоя без магнитного пересоединения обеспечивается приток солнечной плазмы и повышение ее эффективной температуры непосредственно под высокоширотной магнитопаузой. Одновременно, в более глубоких прилегающих погранслоях, выявлены черты как непосредственного проникновения плазмы через полярные каспы (вверх по течению от места наблюдения), так и пересоединения магнитных силовых на дневной части магнитопаузы. Таким образом, эксперимент показывает выход из, казалось бы, неразрешимой дилеммы: пересоединение магнитных полей или микродиффузия определяют основной приток солнечной плазмы в земную магнитосферу — их вклад в общем случае сравним.

Проведенное исследование влияния нелинейных микроструктур на свойства пограничного слоя между движущимися слоями плазмы достаточно неожиданно показало, что при 3-мерном характере возмущений поток набегающей плазмы может спровоцировать «опрокидывание» магнитных силовых линий на границе, т. е. привести к Альвеновскому коллапсу магнитного поля, сопровождаемых ростом магнитных барьеров между

слоями плазмы. Это, в противоположность предыдущему, означает функционирование до сих пор не рассматриваемого в нашей отрасли науки механизма генерации магнитного поля, обеспечивающего разделение движущихся сред. Концепция Альвеновского коллапса обобщена на случай конечного гирорадиуса протонов, что позволило предсказать наличие равновесного течения с тепловой скоростью протонов в окрестности барьеров с масштабами, сравнимыми с гирорадиусом протонов. И, действительно, такое течение было обнаружено по данным как КА КЛАСТЕР, так и ИНТЕРБОЛ-1 как раз в областях микробарьеров, вырастающих до магнитного давления порядка доминирующего теплового давления взаимодействующих плазм. Несколько неожиданным оказался тот экспериментальный факт, что специфичный погранслои с таким околосвуковым течением плазмы и магнитными микробарьерами может наблюдаться в квазистатическом режиме на расстояниях до радиуса Земли.

6. Исследование положения земной магнитопаузы

Обнаружено, что земная магнитопауза сжата на $\sim 5\%$ в направлениях, перпендикулярных плоскости, образуемой векторами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Такое сжатие может являться результатом натяжения обволакивающих магнитопаузу силовых линий межпланетного магнитного поля. Влияния B_z компоненты межпланетного магнитного поля на положение подсолнечной магнитопаузы по данным спутников ПРОГНОЗ и ИНТЕРБОЛ-1 не обнаружено. Уменьшение поперечного сечения магнитопаузы плоскостью Y, Z системы координат GIMP происходит с увеличением динамического давления солнечного ветра ρV^2 . При всех давлениях ρV^2 характерное значение отношения поперечной R_{zGIMP} к продольной R_{yGIMP} осям аппроксимирующего эллипсоида составляет $\sim 0,95$.



7. Экспериментальное исследование пучков ускоренной плазмы, наблюдаемых в пограничном плазменном слое хвоста магнитосферы Земли по данным проекта Cluster

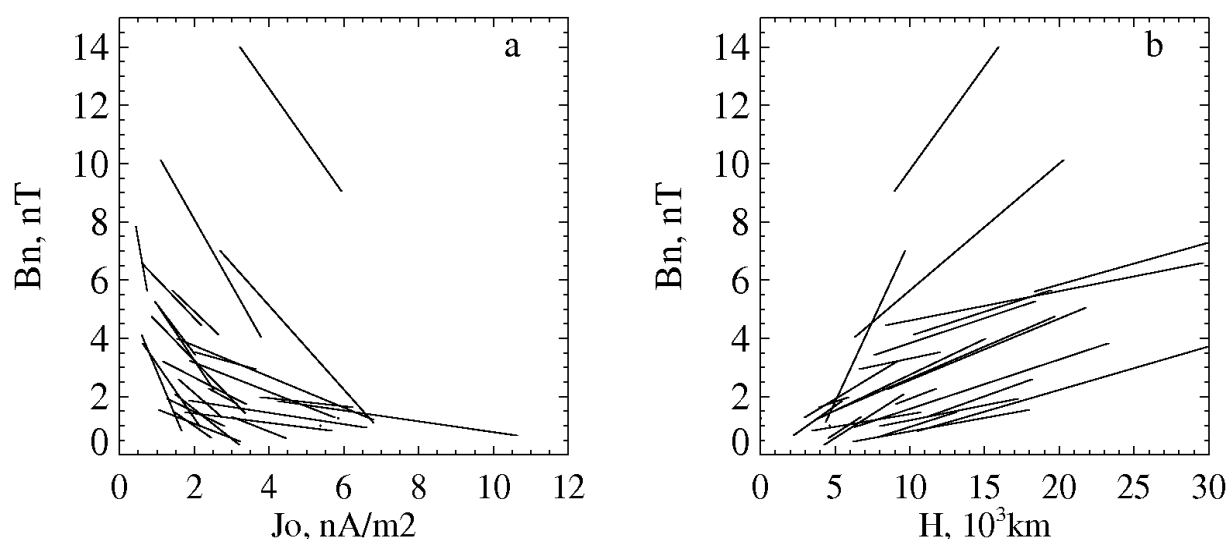
Многоспутниковые измерения Cluster пучков ускоренных ионов (бимлетов), движущихся в пограничном плазменном слое (ППС), позволили разделить временной и пространственный эффекты в наблюдении бимлетов и впервые оценить их минимальную длительность и характерные

пространственные размеры. Установлено, что бимлет представляет собой плазменный филамент, вытянутый вдоль силовых линий магнитного поля (характерный продольный размер несколько десятков земных радиусов) и локализованный в направлении, перпендикулярном магнитному полю (характерные поперечные размеры не превышают одного земного радиуса). Средняя минимальная длительность бимлета ~ 10 мин. Также установлено, что силовые линии магнитного поля, вдоль которых распространяется бимлет, искривлены, в результате чего структура бимлета приобретает вид «змейки».

На основе базы данных пролетов четырехспутниковой системой Cluster хвоста магнитосферы Земли (2001–2003) (на расстояниях от Земли $\sim 19R_E$) произведен анализ магнитных возмущений высокоширотной границы ППС, наблюдаемых при прохождении по ней высокоскоростных бимлетов. Возмущение границы ППС приводит к увеличению энергии холодной плазмы, вытягиваемой из ионосферы в высокоширотные доли хвоста. Показано, что данные возмущения могут быть вызваны неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, возникающей из-за большой разницы скоростей бимлета и окружающей плазмы. Установлено, что возмущения границы ППС распространяются к Земле с альвеновской скоростью и наряду с флэппингом хвоста вносят дополнительный вклад в колебательные движения ППС.

8. Утонышение и вытягивание плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли перед суббури

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. длительные пересечения утоншающегося токового слоя во время предварительной фазы суббури. Установлены характерные сценарии утоньшения и вытягивания плазменного слоя.



Показано, что утоньшение слоя (увеличение плотности тока) обратно пропорционально величине нормальной компоненты магнитного поля (т. е. вытягиванию) и прямо пропорционально температуре ионов. Слои с доминирующей шировой компонентой магнитного поля (параллельной току) составляют около трети наблюдений и характеризуются выраженным нехаррисовским профилем с узким и более высоким по амплитуде максимумом тока в центре слоя, что указывает на важность рассмотрения задач с трехмерной конфигурацией магнитного поля в теории и моделировании. На рисунке показаны сценарии утоньшения-вытягивания. Соединены только первая и последняя точки каждого интервала. По оси X — утоньшение: плотность тока J_0 (слева) и толщина слоя H (справа). По оси Y — вытягивание: величина нормальной компоненты магнитного поля B_n .

9. Моделирование плазменных систем в хвосте магнитосферы

Представлена аналитическая самосогласованная модель многокомпонентных токовых слоев, в которых плазма состоит из ионов солнечного ветра и ионосферных ионов. Влияние электронной популяции учтено в предположении, что электроны имеют квазиравновесное больцмановское распределение в электростатическом поле, в котором электроны поддерживают ток с резким пиком в центре токового слоя. Вклад тяжелых ионов O^+ учитывается в виде одного из слагаемых в системе уравнений типа Грэда–Шафранова, описывающих квазиравновесную конфигурацию. Показано, что вклад ионов кислорода в общий ток поперек хвоста в реальных условиях не может превышать 30 %, но положительные «крылья» плотности тока, поддерживаемые, в основном, ионами O^+ , приводят к значительному уширению профиля тока. Очень узкий электронный слой толщиной порядка $L \sim (0,05 - 0,1)\rho_L$ (где ρ_L — гирорадиус протона) вложен в тонкий протонный слой с $L \sim \rho_L$, который, в свою очередь, вложен внутрь относительно толстого кислородного токового слоя ($L \sim (5 - 10)\rho_L$). Более того, весь токовый слой как бы вложен внутрь еще более толстого плазменного слоя (толщина которого в модели равна бесконечности, а в реальной магнитосфере может достигать от нескольких до десятка R_E , т. е. много больше толщины токового слоя). Таким образом, представленная в данной главе модель позволяет рассмотреть четыре уровня вложенных друг в друга плазменных структур, за что она получила название «модель матрешки».

10. Исследование механизма вспышек высыпаний релятивистских электронов из внешней области радиационного пояса

Наблюдения высыпаний частиц в атмосферу Земли, выполненные на низколетящих спутниках, вызвали большой интерес к вспышкам высыпаний релятивистских электронов из внешней области радиационного пояса. В качестве механизма, приводящего к таким вспышкам, предлагается резонансное рассеяние (на высоких циклотронных резонансах) частиц в конус потерь в результате взаимодействия релятивистских электронов с

интенсивными верхнегибридными волнами, которые часто наблюдаются вне плазмосферы.

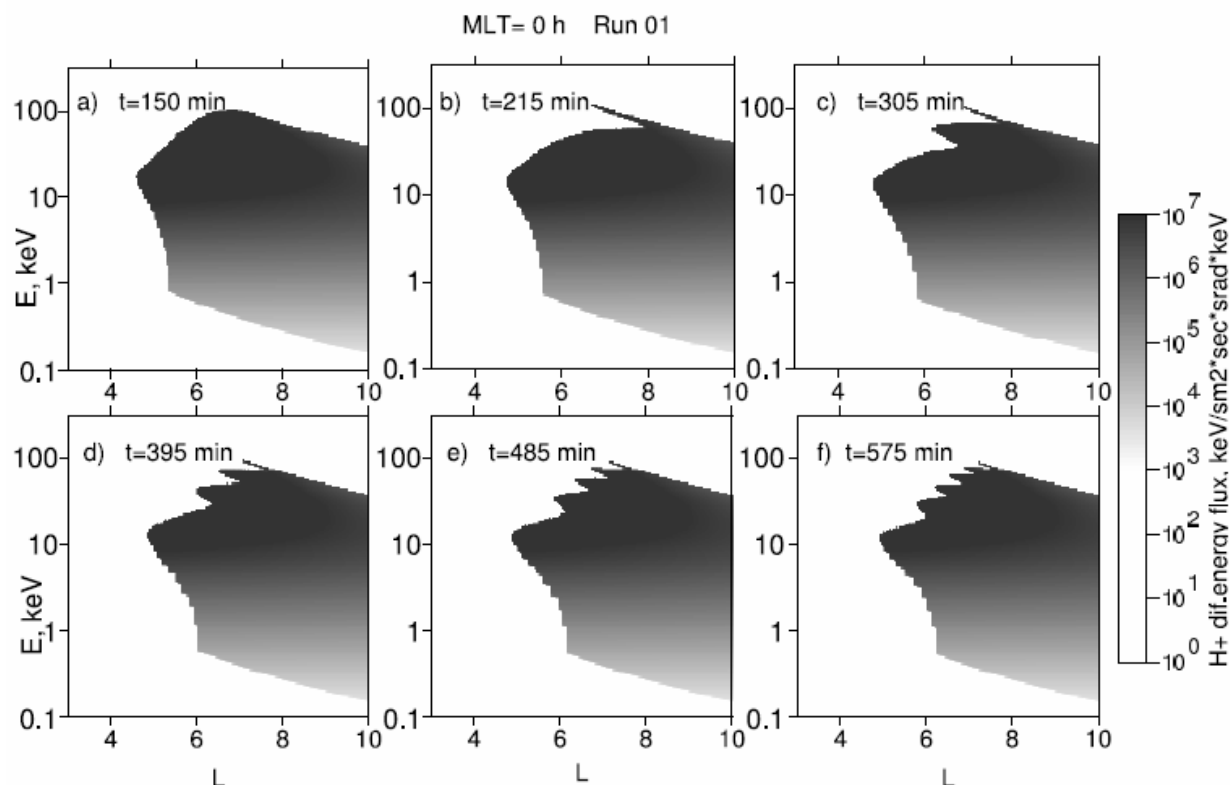
Рассмотрены два случая: квазимонохроматической волны и широкого спектра, для которых рассчитаны коэффициенты диффузии частиц в фазовом пространстве с учетом неоднородности среды. Показано, что релятивистские электроны имеют преимущество над низкоэнергичными электронами с точки зрения количества циклотронных резонансов, которые частица проходит за один баунс-период.

Благодаря квазипродольному распространению верхнегибридных волн, резонансное взаимодействие волн и частиц может происходить на многих баунс-периодах, что облегчает процесс рассеяния частиц в конус потерь.

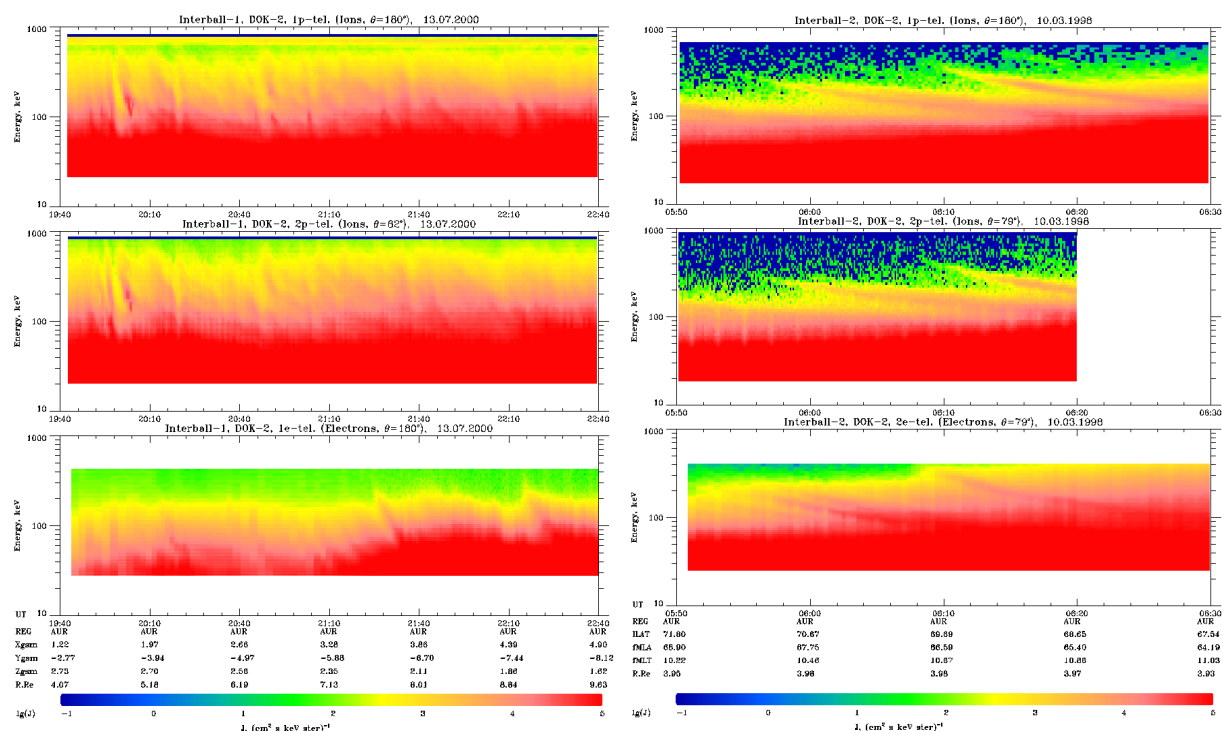
Развитая теория объясняет две основные особенности вспышек высыпаний релятивистских электронов, а именно, сильную зависимость потока высыпания от энергии частиц и мелкомасштабную структуру вспышек высыпаний, связанную главным образом с сильной локализацией и неоднородностью области возбуждения верхнегибридных волн, ответственных за рассеяние.

11. Эффект экранировки электрического поля во внутренней магнитосфере и конвекции плазмы в зависимости от концентрации и температуры протонов на внешней границе

С помощью самоогласованной модели электрического поля внутренней магнитосферы Земли проведены расчеты для потенциала электрического поля и продольных токов. Для разных значений температуры протонов на внешней границе моделирования (в интервале от 1,5 до 15 кэВ) и разных значений концентраций (от 0,2 до 1 см⁻³) получено, что экранировка значительно зависит от МЛТ: на дневной стороне вследствие высокой проводимости экранировка слабее, чем на ночной. Вариации концентрации протонов на границе значительно более сильно влияют на экранировку, чем вариации температуры. Уменьшение (увеличение) ионосферной проводимости, обусловленной авроральными высыпаниями, увеличивает (уменьшает) эффект экранировки. Из сравнения с моделью электрического поля Волланда–Стерна следует, что во внутренней магнитосфере электрические поля и эффект экранировки имеют гораздо более сложную структуру, чем в простых аналитических моделях. Исследовано влияние изменения разницы электрического потенциала поперек шапки на концентрацию протонов. Чем больше концентрация частиц на границе, тем сильнее эффект экранировки, и тем больше L -параметр, где формируются носовые структуры. Ниже представлены энерго-временные спектрограммы протонов во внутренней магнитосфере вдоль среза при постоянном магнитном локальном времени. Сначала разница потенциала увеличивалось в течение 30 минут. Затем в течение часа она была постоянна и в течение 30 мин уменьшалась до начального состояния. Показано, что такие структуры формируются в результате уменьшения перепада потенциала на границе и, вероятно, имеют ту же природу что и явление «дрейфового эха».



12. Изучение природы, свойств и происхождения тонких дисперсионных структур (ТДС) в спектрах энергичных частиц



Тонкие Дисперсионные Структуры (ТДС) в спектрах энергичных частиц во внешней магнитосфере были открыты в эксперименте ДОК-2 на борту спутников ИНТЕРБОЛ-1 и -2 (1995–2000). Всего было зарегистрировано более 1000 случаев. При этом наблюдались два типа ТДС: «быстрые» с длительностью < 3 мин и «медленные» с длительностью > 5 мин.

Показано, что первые, наблюдавшиеся на ночной стороне магнитосферы, имеют времяпролетный характер и соответствуют приходу частиц из хвоста магнитосферы после их импульсного ускорения в плазменном слое. Расчеты траекторий движения частиц показали, что большая часть этих частиц отражается от внешней магнитосферы и возвращается обратно в плазменный слой. Однако небольшая их часть ($<1\%$) захватывается в области замкнутых силовых линий, начинает градиентно-центробежный дрейф вокруг Земли и является ответственной за «медленные» ТДС. Хотя средняя частота наблюдения «медленных» ТДС в авроральных зонах составляет 0,17 в час, они могут совершить несколько оборотов вокруг Земли и даже одно событие дает заметную добавку в полную плотность энергии (54-52%) и полный поток энергии (67-66 %) частиц во внешней магнитосфере. Примеры спектрограмм для двух типов ТДС: слева — «короткие» (времяпролетная дисперсия), справа — «длинные» (градиентно-дрейфовая дисперсия).

2.1.2. ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ИМ. Н.В. ПУШКОВА РАН

2.1.2.1. Проект КОРОНАС-Ф: Солнечная и солнечно-земная физика

В 2007–2008 гг. продолжалась обработка данных, полученных спутником КОРОНАС-Ф в период его работы на околоземной орбите (2001–2005). КОРОНАС-Ф наблюдал Солнце и регистрировал проявления его активности в околоземном космическом пространстве.

Гелиосейсмологический эксперимент ДИФОС/КОРОНАС-Ф

Используя данные гелиосейсмологического прибора ДИФОС/КОРОНАС-Ф, продемонстрированы возможности разработанного нового метода обработки временных серий наблюдений для определения с высокой точностью средних частот расщепленных линий р-мод глобальных колебаний Солнца, а также для изучения природы невращательного расщепления линий в спектре р-мод колебаний.

Точное определение частот линий р-мод колебаний является одной из основных задач глобальной гелиосейсмологии, так как оно определяет точность решения обратной задачи. Для решения этой проблемы были созданы наземные сети наблюдательных станций и космические станции непрерывного наблюдения за Солнцем, поскольку точность измерения частот зависит от продолжительности наблюдений. Однако, оказалось, что линии подвержены расщеплению не связанному с вращением Солнца. В результате, для определения частот линий по длительным рядам наблюдений используются различные статистические методы усреднения, которые дают несовпадающие друг с другом результаты. Таким образом, оказалось, что усилия и средства по созданию наземных и космических станций наблюдений не полностью достигли своей цели. Предложенный новый метод анализа временных серий наблюдений является обобщением концепции аналитического сигнала. Этот метод позволяет найти мгновенную амплитуду, фазу и частоту сигнала, а также отдельно определить вклады амплитудных и частотных флуктуаций в расширение спектральной линии.

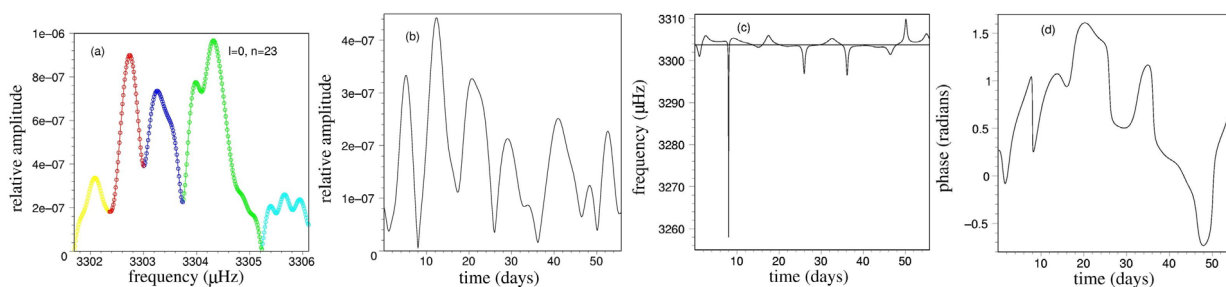


Рис. 1. *a* — спектральная линия глобальной моды колебаний ($l = 0$, $n = 23$), расщепленная на компоненты показанные разными цветами; *b*, *c*, *d* — мгновенные амплитуда, частота и фаза колебаний

На рис. 1 приведены результаты обработки предложенным методом двухмесячной серии наблюдений прибора ДИФОС/КОРОНАС-Ф в диапазоне 350 нм. Линия колебаний глобальной моды с $l=0$, не подверженная расщеплению из-за вращения Солнца, оказывается расщепленной на несколько компонент рис. 1a. Биения между компонентами приводят к вариациям амплитуды моды во времени (рис. 1b). Выбросы мгновенной частоты (рис. 1c) происходят в минимумы амплитуды, что подтверждает тот факт, что вариации амплитуды это результат биений компонент. Скачки фазы (рис. 1d) в минимумах амплитуды приводят к скачкам мгновенной частоты. Были получены аналитические сигналы для каждой из компонент линии, показанных различными цветами на рис. 1a. На рис. 2a, b, c приведены мгновенные амплитуды, частоты и фазы для каждой из компонент сигнала. Наличие выбросов частоты и скачков фазы в минимумах амплитуды является свидетельством того, что компоненты сигнала в свою очередь состоят из субкомпонент, которые не удастся разрешить из-за недостаточной длины реализации. На рис. 2d приведены дисперсии флуктуаций амплитуды и частоты для компонент линии и для всей линии в целом. Во всех случаях дисперсия флуктуаций амплитуды превышает дисперсию флуктуаций частоты в 10–100 раз, т. е. ширина спектральной линии практически полностью определяется флуктуациями амплитуды, в то время как частота р-моды оказывается очень стабильной. Таким образом, новый метод анализа временных рядов позволяет определить частоту линии с высокой точностью. Обнаружены также необычные свойства компонент линии, которые вряд ли могут быть объяснены в рамках теории стохастического возбуждения р-мод колебаний на Солнце.

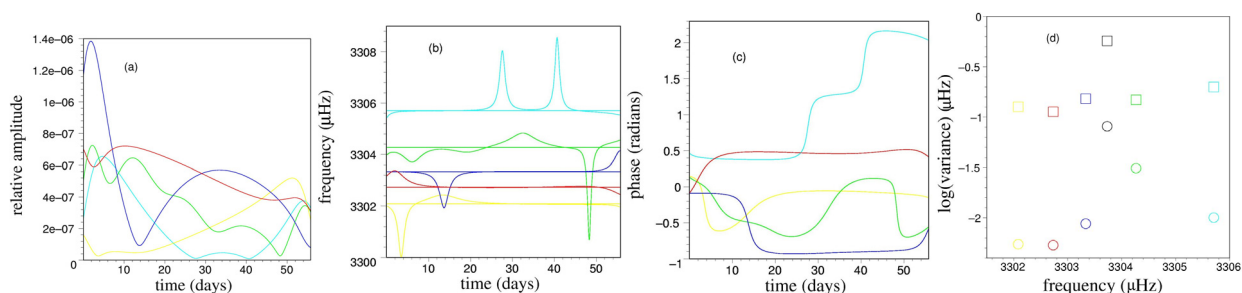


Рис. 2. a, b, c — мгновенные амплитуды, частоты и фазы компонент линии показанных тем же цветом на рис. 1a; d — дисперсия флуктуаций амплитуды (квадраты) и частоты (окружности) компонент. Черным цветом показаны дисперсии амплитуды и частоты для всей линии

Результаты эксперимента СПИРИТ/КОРОНАС-Ф

В ходе эксперимента СПИРИТ, проводившемся на спутнике КОРОНАС-Ф, спектрогелиографом Mg XII получены уникальные в мировой практике *мономатические* изображения Солнца в спектральной линии $\lambda = 8,42 \text{ \AA}$ (резонансная линия иона Mg XII). Эта спектральная линия излучается только при относительно высоких для солнечной короны температурах — $T > 5 \text{ MK}$, которая характерная для солнечных вспышек.

Таким образом, спектрогелиограф Mg XII впервые позволил непосредственно получать изображения горячей вспышечной плазмы, не смешанные с изображением более холодной плазмы спокойной короны.

На основе полученных данных был разработан новый метод и проведен комплексный анализ солнечных вспышек. Получены новые сведения о физических условиях во вспышечной плазме — пространственном распределении температуры, плотности и их временной динамике. Метод основан на рентгеновских изображениях Солнца $\lambda = 8,42 \text{ \AA}$, полученных спектрогелиографом Mg XII, и данных о полных потоках интенсивности в относительно широких спектральных диапазонах $1\text{--}8 \text{ \AA}$ и $0,5\text{--}4 \text{ \AA}$ (полученных рентгеновскими мониторами спутников GOES). Наблюдения спутника RHESSI в жестком рентгеновском диапазоне были использованы для верификации разработанного метода и проверки полученных результатов.

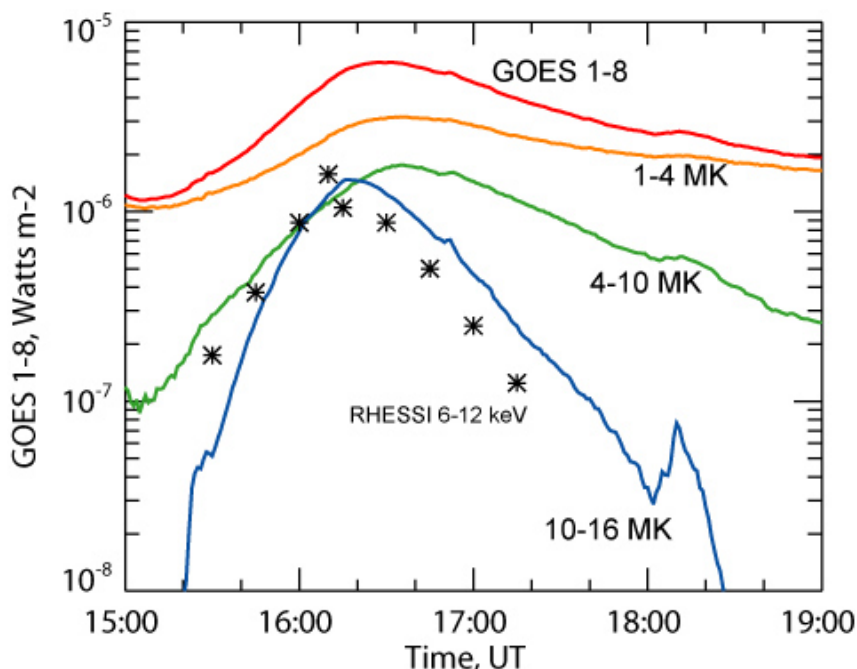


Рис. 3. Полный поток в спектральном диапазоне $1\text{--}8 \text{ \AA}$, измеренный рентгеновским монитором GOES (красная линия), и его декомпозиция на потоки, соответствующие «холодной» — $1\text{--}4 \text{ MK}$, «средней» — $4\text{--}10 \text{ MK}$ и «горячей» — $10\text{--}16 \text{ MK}$ плазме. Приведено для вспышки 26 февраля 2002 г.

Метод для определения температурного состава (дифференциальной меры эмиссии) излучающей плазмы использует полные интенсивности рентгеновского излучения Солнца в различных спектральных диапазонах. На основе измерений в трех различных спектральных диапазонах — монохроматической линии $8,42 \text{ \AA}$ (по данным СПИРИТ) и двух относительно широких интервалах $1\text{--}8 \text{ \AA}$ и $0,5\text{--}4 \text{ \AA}$ (по данным GOES) получены сведения о временной динамике температуры для активных вспышечных явлений, наблюдавшихся на Солнце в феврале 2002 г. В этот период на Солнце произошло несколько характерных вспышечных, и данные СПИРИТ были

получены с высоким временным разрешением 1,5 мин. Было показано, что во время длительных вспышечных событий большое количество плазмы остается при относительно невысоких (для вспышек) $\sim 1\text{--}4$ МК и средних $4\text{--}10$ МК температурах (см. рис. 3).

Монохроматические изображения, полученные спектрогелиографом Mg XII, и сведения о температурном составе (дифференциальной мере эмиссии) были использованы для моделирования пространственных распределений электронных температуры и плотности (T_e , n_e) в области вспышки, наблюдавшейся 26 февраля 2002 г. Анализ изображений показывает, что в центре вспышки было яркое сферическое ядро, которое было окружено менее интенсивной областью. Моделирование пространственного распределения излучения было проведено при помощи сферически симметричных распределений температуры и плотности. Конкретные значения температуры и плотности подбирались для согласия модели с экспериментом. Проведенный анализ показывает, что во вспышке было относительно горячее ядро, температура которого поднималась от 5 МК на периферии до 16 МК в центре, при этом плотность была близка к типичной корональной и изменялась незначительно — от $1,5 \cdot 10^9$ до $2,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Временные профили температуры, полученные при помощи данных о рентгеновских потоках, были использованы для совмещения монохроматического изображения Mg XII с изображением в жестком рентгеновском диапазоне, полученном на спутнике RHESSI (рис. 4).

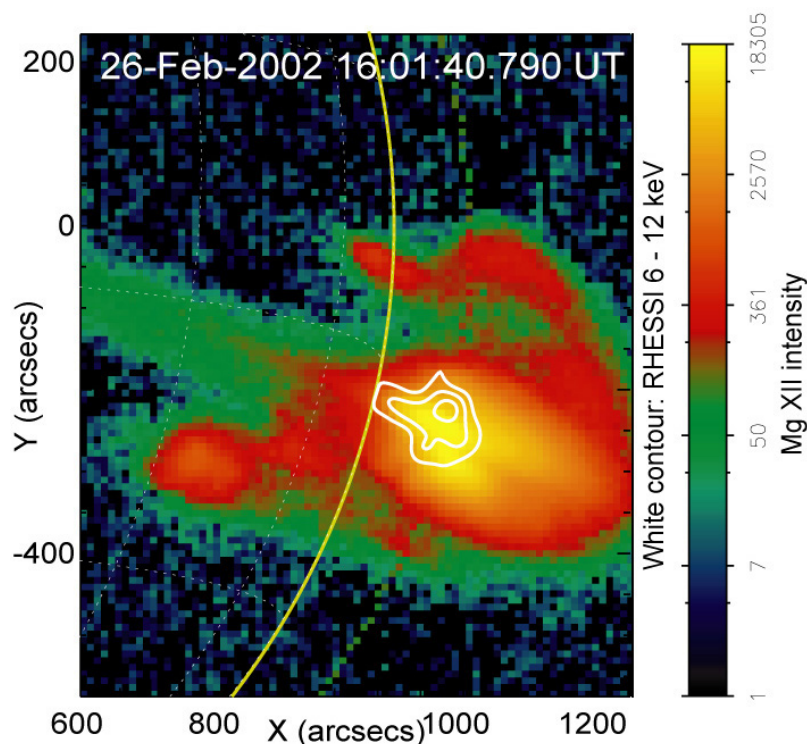


Рис. 4. Монохроматическое изображение спектрогелиографа Mg XII ($\lambda = 8,42 \text{ \AA}$; цветное) и изображение в жестком рентгеновском диапазоне, полученное на спутнике RHESSI (6–12 кэВ; белый контур)

Полученное составное изображение позволило определить границы «горячей» области на изображении спектрогелиографа Mg XII и проверить точность определения пространственных распределений T_e , n_e . Полученные сведения о физических условиях во вспышечной плазме — ее температуре, плотности, их временной динамике могут быть использованы для выбора механизма нагрева вспышечной плазмы. Показано, что полученные результаты согласуются с моделью нагрева плазмы быстрой ударной волной и моделью тонкой мишени.

Высокотемпературная плазма в короне Солнца

Во время солнечных вспышек импульсное выделение энергии приводит не только к ускорению частиц, но и к эффективному нагреву плазмы. Наблюдения, проведенные рентгеновским телескопом SXT на борту спутника Yohkoh (Masuda et al., 1994; Tsuneta et al., 1997), показали, что горячая плазма во вспышках может формироваться как в хромосфере, так и в солнечной короне. В период с 2001 по 2005 г. информацию о пространственных и временных характеристиках высокотемпературной плазмы в короне предоставлял спектрогелиограф RES-K, являвшийся частью комплекса научных инструментов СПИРИТ, работавших на борту российского спутника КОРОНАС-Ф (Oraevsky et al., 2002). Спектрогелиограф RES-K предоставлял монохроматические изображения полного солнечного диска в линии Mg XII 8.42 Å, температура формирования которой составляет 5–15 МК (Zhitnik et al., 2003). Это делало возможным прямые наблюдения горячей корональной плазмы в отличие от данных спутника Yohkoh, который мог определять положение такой плазмы в короне только косвенными методами, основанными на сравнении изображений SXT, полученных с разными фильтрами. Мы использовали преимущества наблюдений RES-K, чтобы исследовать структуру и динамику горячей корональной плазмы во вспышечных областях и в спокойной короне Солнца.

Были проанализированы серии последовательных изображений активной области NOAA 9830, которая наблюдалась спектрогелиометром RES-K в линии Mg XII 8.42 Å channel, начиная с 21:40 UT 21 февраля до 08:00 UT 22 февраля 2002 г., т. е. в период максимума солнечной активности. В этот интервал времени также попала вспышка класса M4.4 по данным GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), произошедшая в наблюдаемой активной области. На рис. 5 показан измеренный временной профиль излучения в линии Mg XII вместе с одновременными профилями излучения в диапазоне энергий 25–50 кэВ (RHESSI — Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) и в диапазоне длин волн 1–8 Å (GOES). Профиль жесткого рентгеновского излучения должен коррелировать с темпом инжекции ускоренных электронов.

Структура активной области в фотосфере и короне показана на рис. 6. Все изображения были приведены к одному масштабу, а также осуществлена их компенсация за счет вращения Солнца. Из анализа изображений

SOHO/EIT и TRACE были выбраны группы магнитных петель, которые обозначены на рисунке как A1–A4. На нижней панели эти группы петель нанесены на изображения высокотемпературных источников излучения, положение которых определено по линии MgXII. Сравнение панелей на рис. 6 показывает, что положение высокотемпературных областей совпадает с системами магнитных петель, причем максимум интенсивности излучения горячей плазмы приходится на области вблизи вершин магнитных петель.

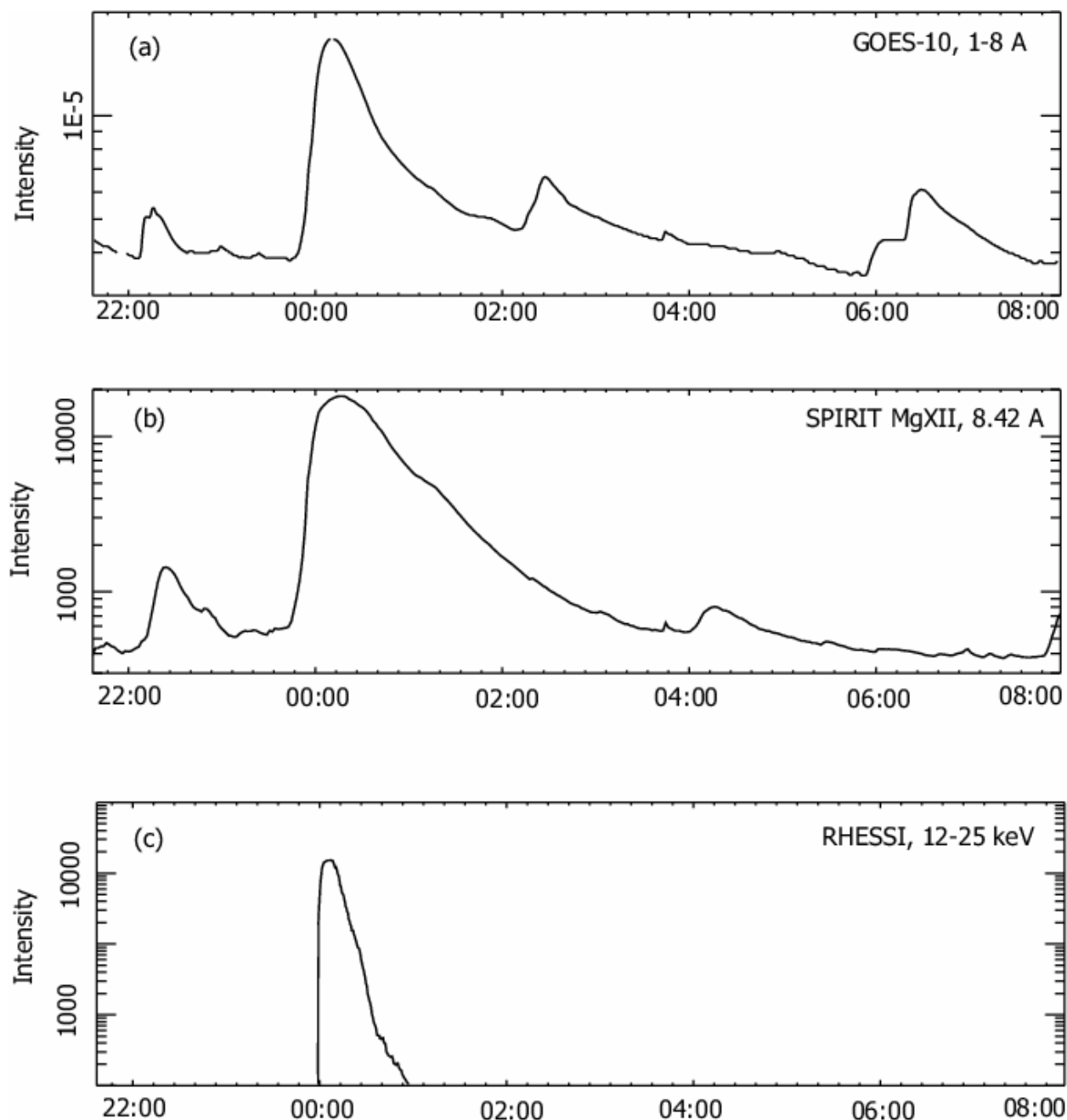


Рис. 5. Временные профили излучения: *a* — интегральное излучение Солнца в диапазоне длин волн 1–8 Å по данным GOES; *b* — излучение высокотемпературной плазмы в линии MgXII 8.42 Å; *c* — жесткое рентгеновское излучение вспышки в диапазоне 25–50 кэВ по данным RHESSI

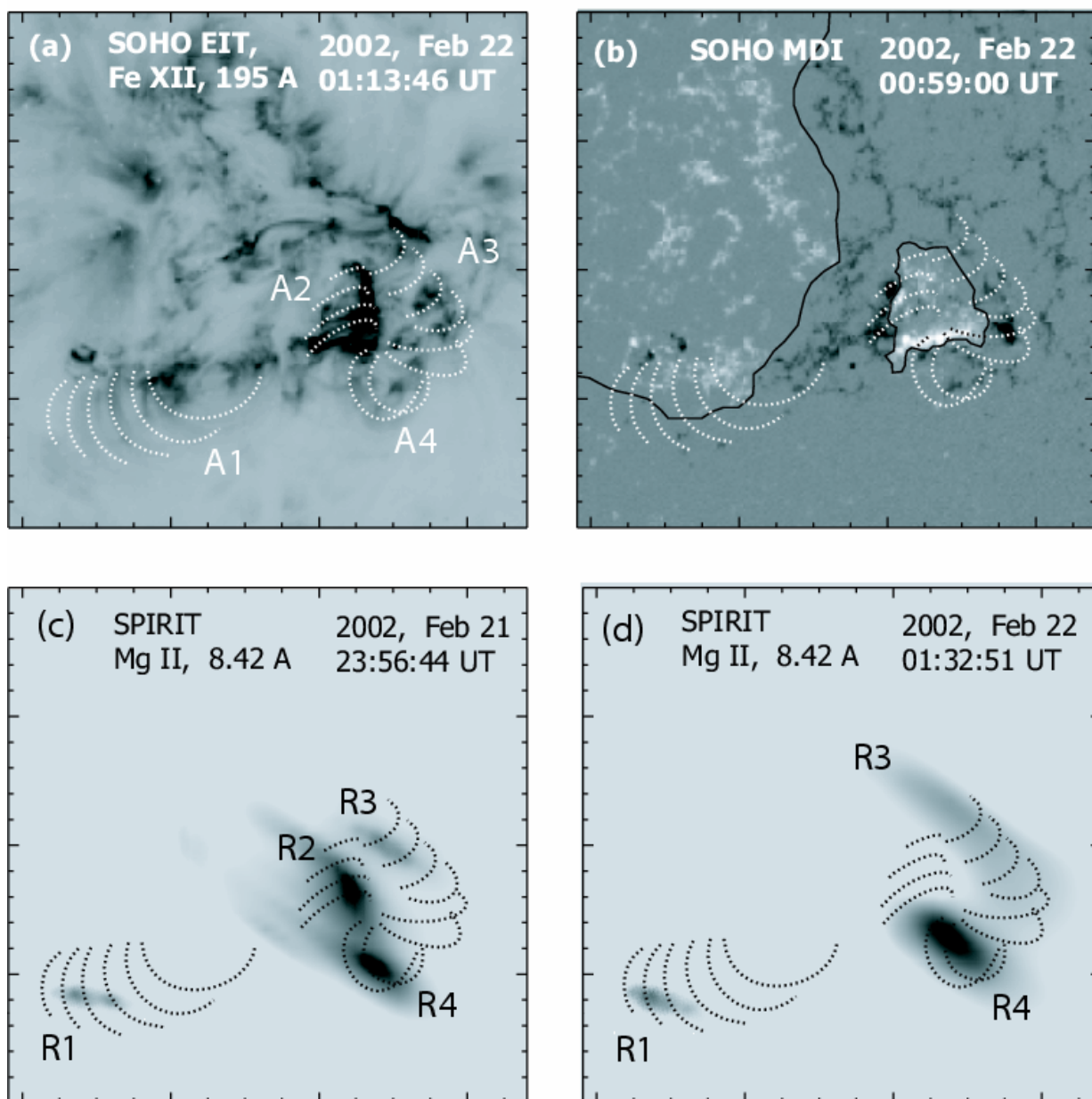


Рис. 6. Активная область NOAA 9830: *a* — изображение SOHO/EIT в линии 195 Å; *b* — магнетограмма SOHO/MDI и нейтральная линия фотосферного магнитного поля; *c* — положение областей высокотемпературной плазмы (R1-R4) до вспышки (изображения СПИРИТ в линии MgXII 8.42 Å); *d* — распределение высокотемпературной плазмы после вспышки. Системы петель, наблюдавшиеся спутников TRACE, показаны пунктирной линией и символами A1-A4

Во время рассматриваемой серии наблюдений произошла вспышка класса M4.4. Ее начало по наблюдениям в линии MgXII пришлось на 23:45 UT и совпало с ядром горячей плазмы R2 (рис. 6). Во время вспышки ядра R2–R4 слились на изображениях СПИРИТ, так что нельзя было изучать их динамику отдельно. Ядро R1 находилось на большом расстоянии от центра вспышки, и его независимые измерения можно было проводить даже во время максимума вспышки. На рис. 7 показан временной профиль трех слившихся ядер R2–R4 и профиль удаленного ядра R1. Примечательной особенностью оказалось, что временные профили показывают корреляцию,

которая хорошо выражена сразу на нескольких интервалах времени. В частности, через некоторое время после начала вспышки в ядре R2 был зарегистрирован рост излучения в удаленном ядре R1. Основываясь на временной задержке 5 мин, и расстоянии между ядрами 210 000 км, была оценена скорость распространения возмущения из центра вспышки — 650 км/с.

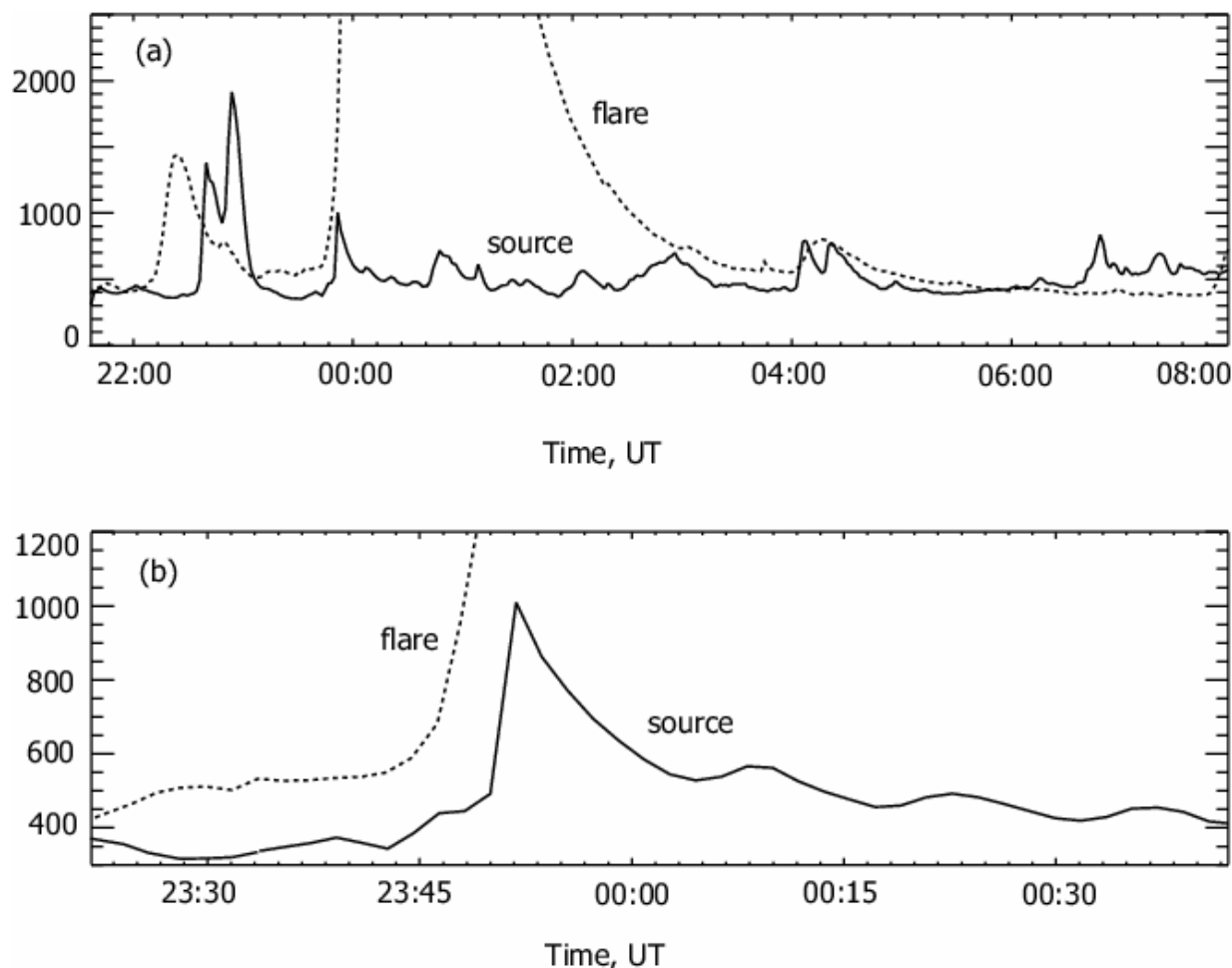


Рис. 7. Сравнение профилей излучения высокотемпературной плазмы в ядре вспышки (пунктирная линия) и в удаленном источнике R1 (сплошная линия)

Литература

- Masuda S., Kosugi T., Hara H. et al. // Nature. 1994. V. 371. P. 495.*
Tsuneta S., Masuda S., Kosugi T. // ApJ. 1997. V. 478. P. 787.
Oraevsky V.N., Sobelman I.I. // Astron. Lett. 2002. V. 28(6). P. 401.
Zhitnik I.A., Bugaenko O.I., Ignatiev A.P. et al. // MNRAS. 2003. V. 338. P. 67.

Корона в жестком ультрафиолетовом диапазоне

Телескоп СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф (26 июля 2001 – 5 декабря 2005 г.) впервые наблюдал солнечную корону в диапазонах 175 Å (линии ионов железа Fe IX, X and XI) и 304 Å (линия иона HeII) в режиме коронографа на расстоянии до 5 солнечных радиусов. Этот диапазон

является промежуточным между полями зрения обычных ВУФ-телескопов и большинства коронографов видимого диапазона и представляет большую важность для исследований формирования структуры стримеров, ускорения выбрасываемого вещества и источников быстрого и медленного солнечного ветра.

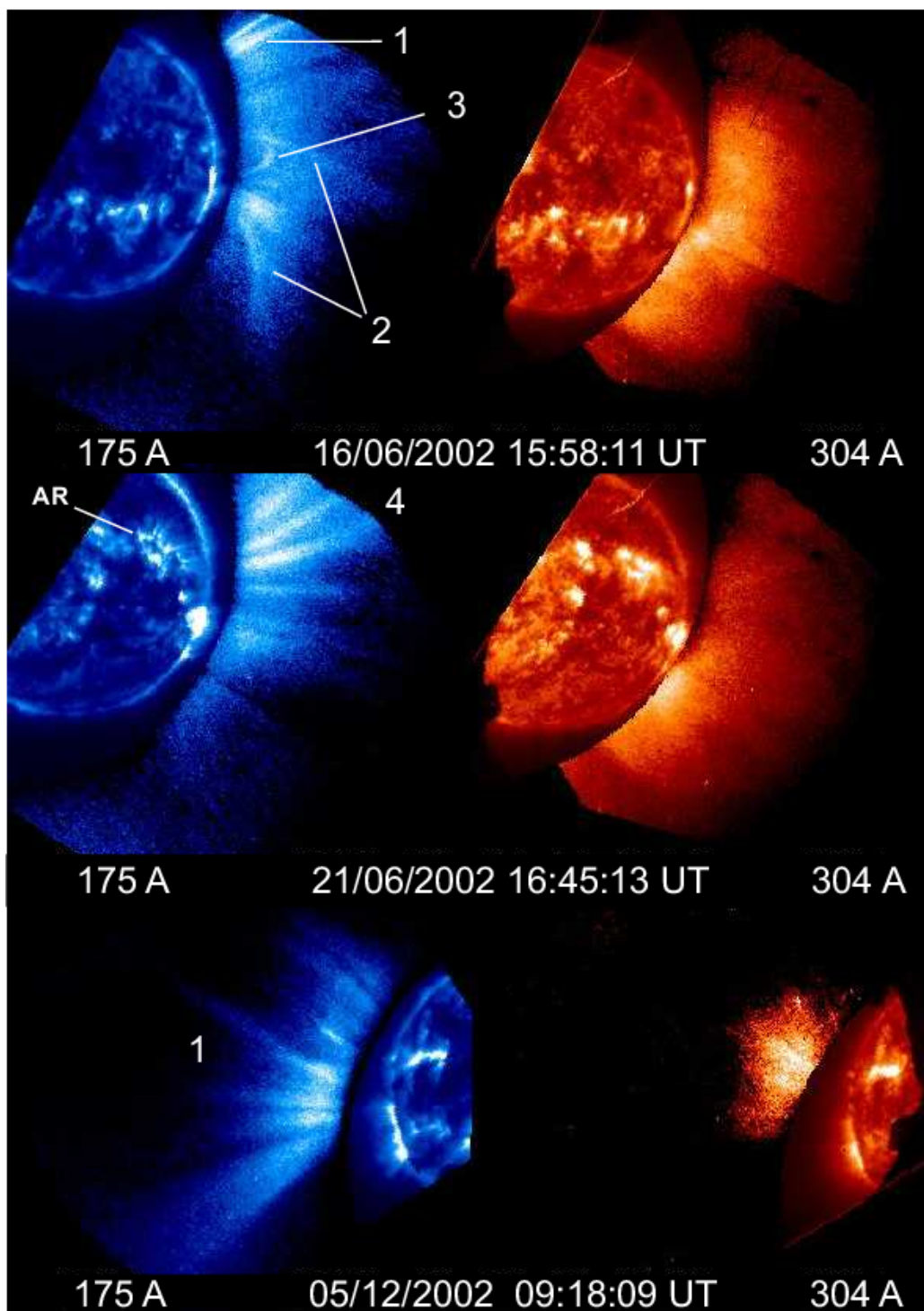


Рис. 8. Характерные элементы структуры, наблюдавшиеся телескопом-коронографом СПИРИТ в диапазонах 175 и 304 Å: 1 — радиальные лучи; 2 — нерадиальные лучи; 3 — всплывающая петля; 4 — пучок лучей, связанных с активной областью на диске (поток солнечного ветра)

Продолжительные коронографические наблюдения короны в ВУФ-диапазоне, проведенные в период высокой солнечной активности июне и декабре 2002 г. показали, что в диапазоне 175 Å корона состоит из диффузной квази-симметричной части (совокупность неразрешенных петель) и структуры ярких лучей (радиальных или нерадиальных, элементы 1 и 2 на рис. 8), начинающихся с поверхности Солнца. Некоторые из этих лучей связаны с активными областями и выявляют потоки солнечного ветра (структура 4 на рисунке). Наблюдались также несколько больших всплывающих петель (структура 3 на рисунке), которые были ассоциированы с корональными выбросами массы по каталогу LASCO.

В диапазоне 304 Å корона более диффузна и менее однородна, корональные лучи едва проявляются. Анализ радиальной зависимости яркости в линии He II показал, что до расстояний 1,5 радиусов это излучение обусловлено столкновительным возбуждением, на больших расстояниях преобладает резонансное рассеяние.

Литература

Slemzin V., Bougaenko O., Ignatiev A., Kuzin S., Mitrofanov A., Pertsov A., Zhitnik I. Off-limb EUV observations of the solar corona and transients with the CORONAS-F/SPIRIT telescope-coronagraph // *Ann. Geophys.* 2008. N. 26 P. 1–10.

Динамика спектров жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным прибора ИРИС/КОРОНАС-Ф

По данным прибора ИРИС/КОРОНАС-Ф была изучена динамика энергетических спектров жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек различного класса, в результате чего были установлены изменения формы спектров во времени, отражающие изменения функции распределения ускоренных во вспышках электронов. Вспышечный спектрометр ИРИС обладал высокой чувствительностью измерения рентгеновского излучения Солнца, и позволял детально исследовать спектрально-временные характеристики мягкого рентгеновского излучения (2–15 кэВ) как мощных, так и слабых солнечных вспышек вместе с излучением спокойного Солнца, когда интенсивность излучения составляла не более $\sim 10^{-5}$ эрг.см⁻².с⁻¹ (~ 10 нВт/м²); эволюцию энергетических спектров рентгеновского излучения по 64-канальным аппаратурным спектрам (2–150 кэВ) с временным разрешением 1 с. Ниже приводятся результаты анализа динамики спектров рентгеновского излучения четырех солнечных вспышек рентгеновских классов C и M, зарегистрированных спектрометром ИРИС в течение 2001–2002 гг.

Для солнечной вспышки рентгеновского класса M1.2 15 апреля 2002 года (начало в 23:05 UT), наиболее мощной из рассмотренных, получен временной профиль жесткого рентгеновского излучения вспышки с секундным временным разрешением в пяти энергетических диапазонах (рис. 9a), на котором четко прослеживается импульсная структура этого

излучения порядка 10–20 с. Проведенный спектральный анализ этого излучения в энергетическом диапазоне 15–24 кэВ подтверждает существование периодического компонента с периодом 22 с. На рис. 9 приведены спектр фона перед вспышкой (б) и спектры жесткого рентгеновского излучения, измеренные с интервалом 1 с, на фазах максимума (в) и спада (г). Как видно из рисунков спектр излучения вспышки с большой точностью может быть аппроксимирован степенной зависимостью (за исключением фона в области высоких энергий) на всех стадиях развития вспышки, при этом показатель спектра изменяется во времени. Так спектр фона перед вспышкой может быть описан степенной функцией с показателем $\gamma \approx -2,7$ (рис. 9б), который уменьшается на фазе роста, достигая значения $\gamma \approx -3,6$ на максимуме интенсивности (рис. 9в), затем увеличивается на фазе спада (рис. 9г).

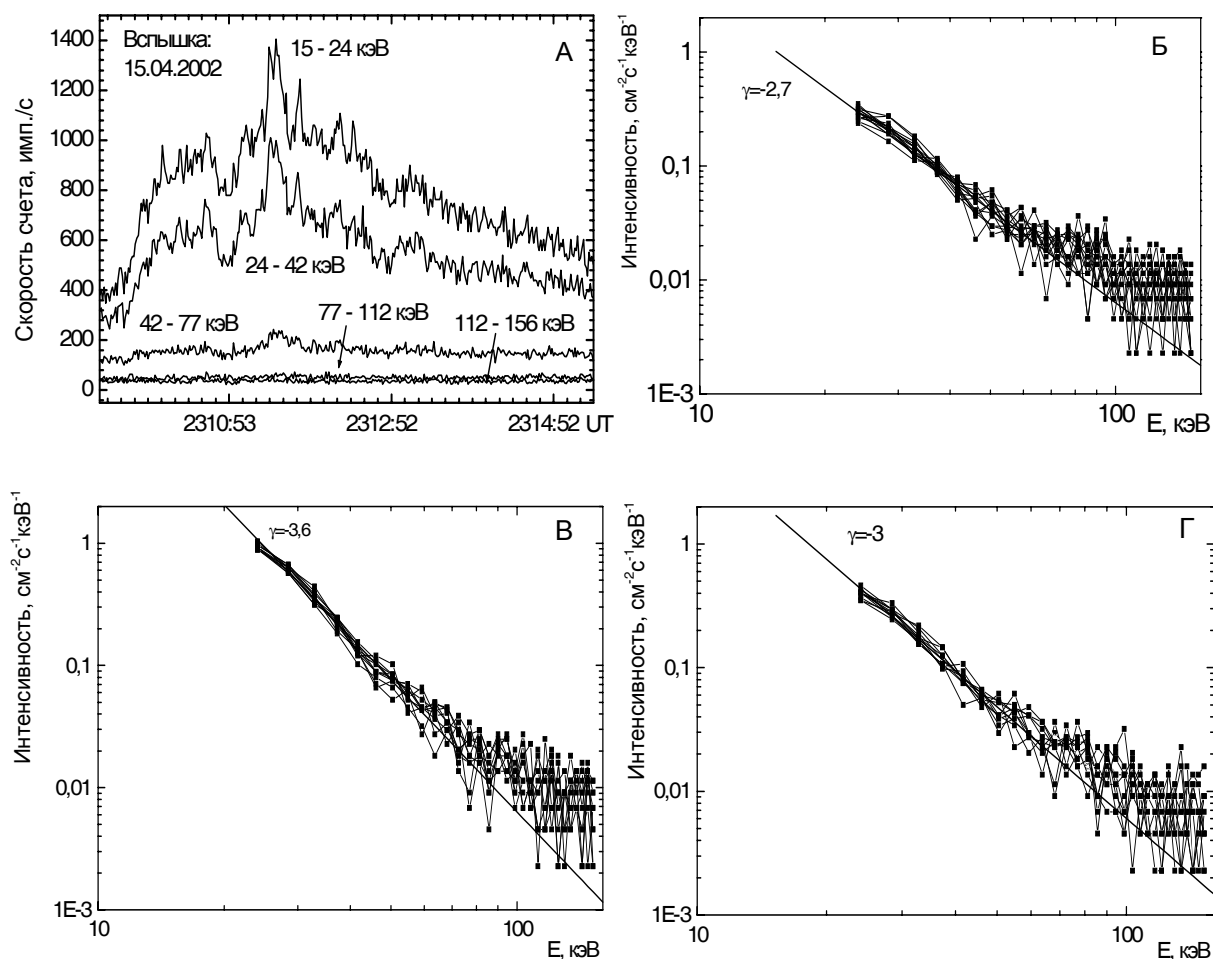


Рис. 9. Временной профиль (а) и энергетические спектры на фазе максимума (в) и спада (г) рентгеновского излучения вспышки 15 апреля 2002 года; б — спектр фонового излучения перед вспышкой

Для достаточно слабой солнечной вспышки 26 июля 2002 года, начавшаяся в 09:20:31 UT, спектр жесткого рентгеновского излучения

отличался от спектра предыдущей вспышки тем, что его форма изменялась во время развития вспышки. На начальной стадии роста (стадия I на рис. 10) форма спектра неустойчива (переходит от степенной зависимости к нестепенной), на стадии роста (стадия II на рис. 10) спектр становится устойчивым и носит явно выраженный нестепенной характер (рис. 11а) за счет большего количества квантов с энергией меньше 40 кэВ. Постоянная нестепенная форма спектра сохраняется на фазе максимума и на части фазы спада, после чего (стадия III на рис. 10) форма спектра меняется и может быть описана степенной зависимостью (рис. 11б). Очевидно, что подобное поведение спектра данной вспышки описывает эволюцию функции распределения излучающих электронов.

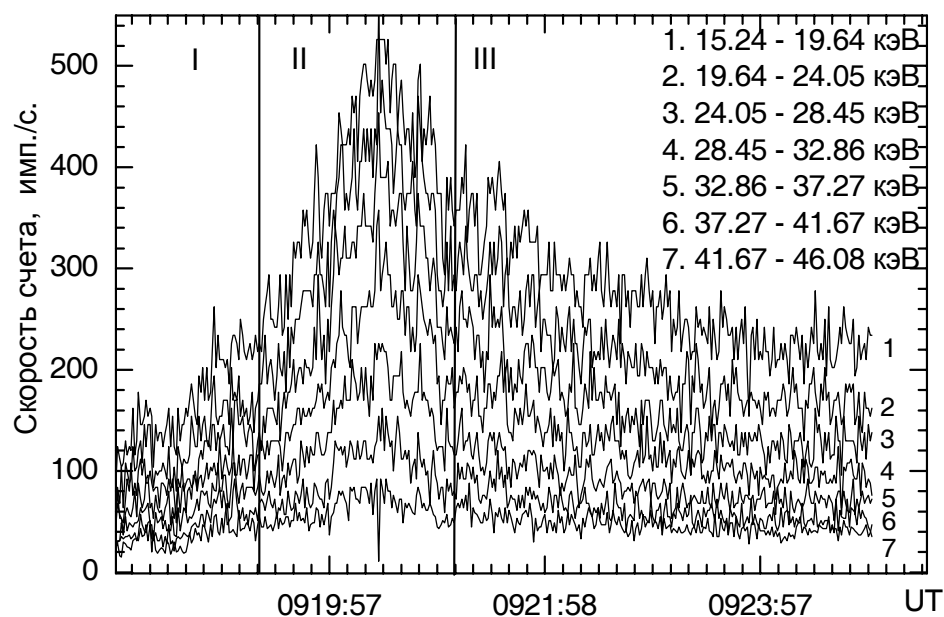


Рис. 10. Временной профиль жесткого рентгеновского излучения вспышки 26 июля 2002 г.

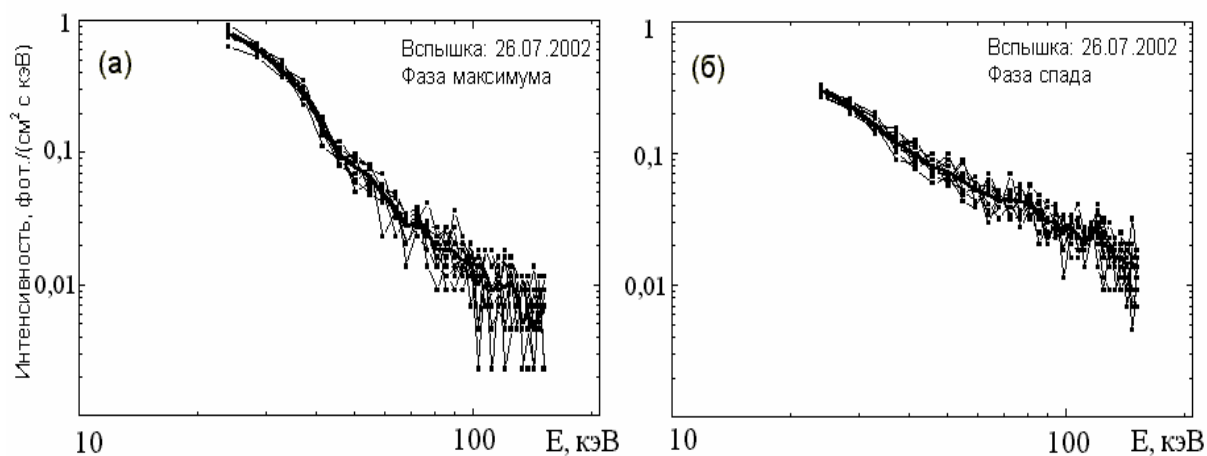


Рис. 11. Энергетические спектры жесткого рентгеновского излучения вспышки 26 июля 2002 г. на фазе максимума (а) и спада (б)

Для солнечной вспышки 19 декабря 2001 г., относящейся к рентгеновскому классу C4.9 (начало в 02:30:40 UT), энергетический спектр жесткого рентгеновского излучения имел нестепенной вид на фазах роста, максимума и спада излучения (рис. 12). Для данной вспышки скорость счета квантов с энергией более 110 кэВ не превышала значения фона. Данный спектр может быть описан как тепловой, так и нетепловой моделями и, поэтому, выбор между этими моделями затруднен. В пользу нетепловой модели можно сказать только то, что для описания жесткого рентгеновского излучения тепловой моделью потребуется нагрев плазмы до чрезвычайно высокой температуры, превышающей 10^8 К, что маловероятно для событий данного рентгеновского класса.

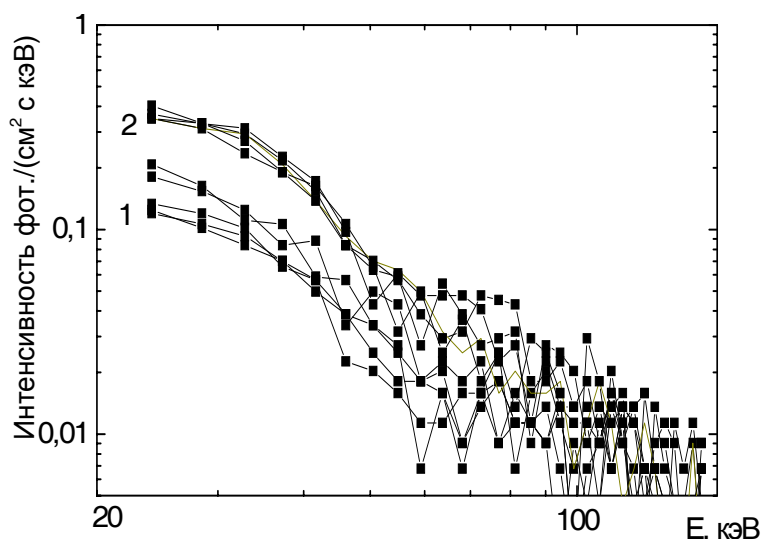


Рис. 12. Энергетические спектры жесткого рентгеновского излучения, измеренного с временным разрешением 1 с на стадиях роста (1) и максимума (2) для вспышки 19 декабря 2001 г.

Для солнечной вспышки 29 октября 2002 г/ (начавшейся в 21:47:02 UT), временной профиль, просуммированный в энергетическом диапазоне 24–160 кэВ по четырем энергетическим каналам прибора, представлен на рис. 13а. Общая продолжительность рентгеновского излучения вспышки составляла около одной минуты. Рентгеновский класс вспышки — C1.8. Временной профиль излучения состоит из медленно меняющегося компонента, на котором отчётливо видны многочисленные импульсы тонкой временной структуры. Наиболее отчётливо импульсная структура регистрировалась на стадиях максимума и спада излучения. Данная вспышка отличается от описанных выше наличием «излома» энергетического спектра в области $<<45$ кэВ. На рис. 13б приведены измеренные с интервалом 1 с и усредненные за 10 с спектры на фазах роста, максимума и спада. Как видно из рисунка на фазах роста и максимума формируется спектр, имеющий сложную форму, который можно условно разделить на две составляющих с точкой «излома» $<<45$ кэВ. Часть спектра в области малых энергий, до точки «излома», вероятно, является тепловым излучением горячей плазмы, а в

области высоких энергий, после этой точки — объясняется тормозным излучением быстрых электронов. Такая форма спектра сохраняется и на спаде вспышки. Другой характерной особенностью спектра вспышки 29 октября 2002 г., является то, что он становится круче с ростом энергии. Такое поведение спектра может быть объяснено, если функция распределения быстрых электронов, генерирующих тормозное рентгеновское излучение, имеет обрыв при некоторой максимальной скорости, соответствующей энергии $\ll 160$ кэВ.

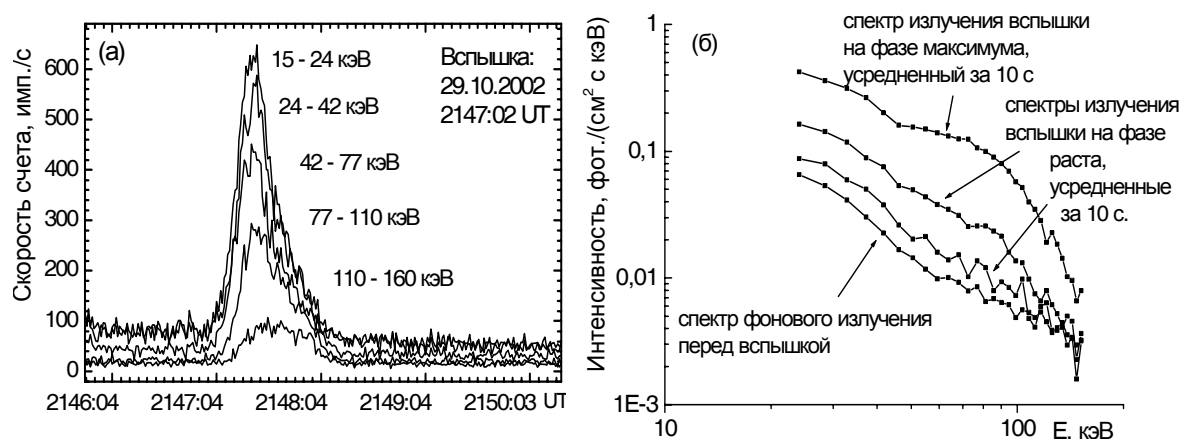


Рис. 13. Временной профиль (а) и спектры (б) рентгеновского излучения вспышки 29 октября 2002 г.

Таким образом, на основе проведенного анализа установлено, что для мощной вспышки рентгеновского класса *M* энергетический спектр жесткого рентгеновского излучения являлся степенным на протяжении всей вспышки, а для более слабых вспышек класса *C* спектр был нестепенной, с возможным изломом в области энергии $\ll 45$ кэВ. Изменения энергетического спектра излучения вспышки отражают эволюцию функции распределения ускоренных во вспышках электронов.

Спектрометрия рентгеновского излучения Солнца и свечение ночной атмосферы Земли по данным прибора РПС-1/КОРОНАС-Ф

По данным прибора РПС-1/КОРОНАС-Ф проанализированы энергетические спектры некоторых слабых солнечных вспышек в различных фазах их развития, а также спектры фонового предвспышечного рентгеновского излучения; изучено рентгеновское свечение ночной атмосферы Земли, построены контурные карты Земли, дающие представление о глобальной картине усредненных за выбранный период свечений в интервалах энергий 3–5; 5–8; 8–16 и 16–31,5 кэВ.

Спектрометрия рентгеновского излучения Солнца

Классификация солнечных рентгеновских вспышек осуществляется на основе патрульных наблюдений Солнца в мягком рентгеновском диапазоне

(1,5–24,8 кэВ) с помощью ИСЗ GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Класс вспышки определяется по величине потока излучения в максимуме ее развития. В этой классификации отсутствуют данные об энергетических спектрах, и временные особенности вспышек описываются недостаточно подробно. Спектрометр РПС-1/КОРОНАС-Ф проводил измерения солнечного рентгеновского излучения в диапазоне энергий 3–31,5 кэВ и получил обширные экспериментальные данные о спектрах мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек.

На рис. 14 показаны спектры фонового излучения Солнца, зарегистрированные прибором РПС-1/КОРОНАС-Ф в момент прохождения КОРОНАС-Ф района земного экватора в октябре 2003 г., когда резко изменился уровень солнечной активности. На рисунке для каждого спектра указаны номер сеанса связи, день, количество солнечных пятен (W), а также данные фонового излучения по GOES в тех же единицах, что и вспышечное излучение. Из рисунка видно, что как по данным GOES, так и РПС-1, фоновый поток и жесткость излучения Солнца растут вместе с ростом солнечной активности.

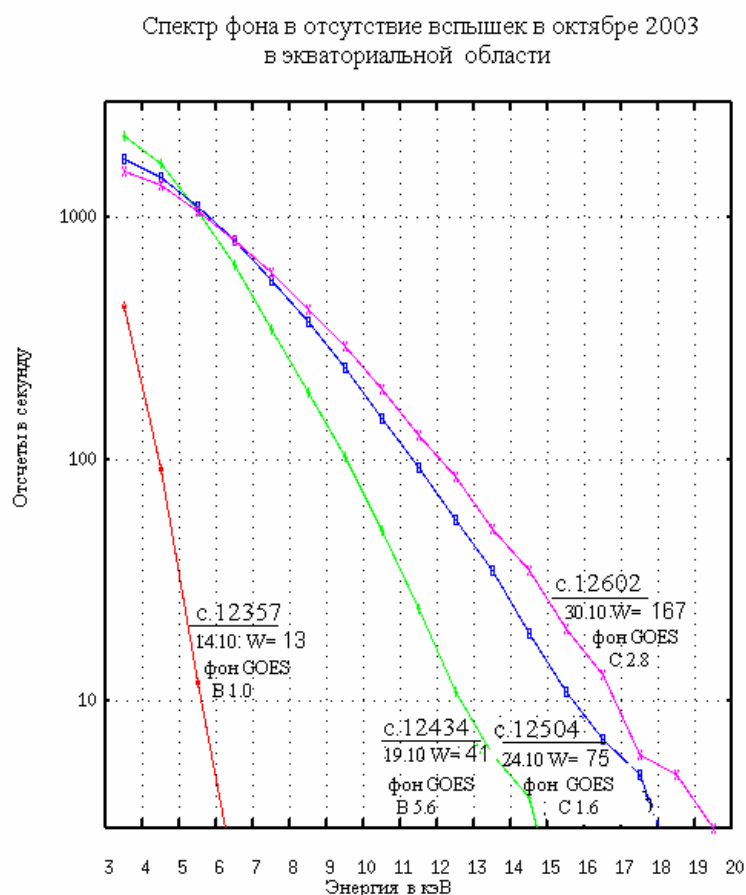


Рис. 2

Рис. 14. Спектры фонового излучения Солнца, измеренные прибором РПС-1/КОРОНАС-Ф в области экватора Земли в октябре 2003 г., которым приписаны номер сеанса связи, день, число солнечных пятен W , а также поток фонового излучения по данным GOES

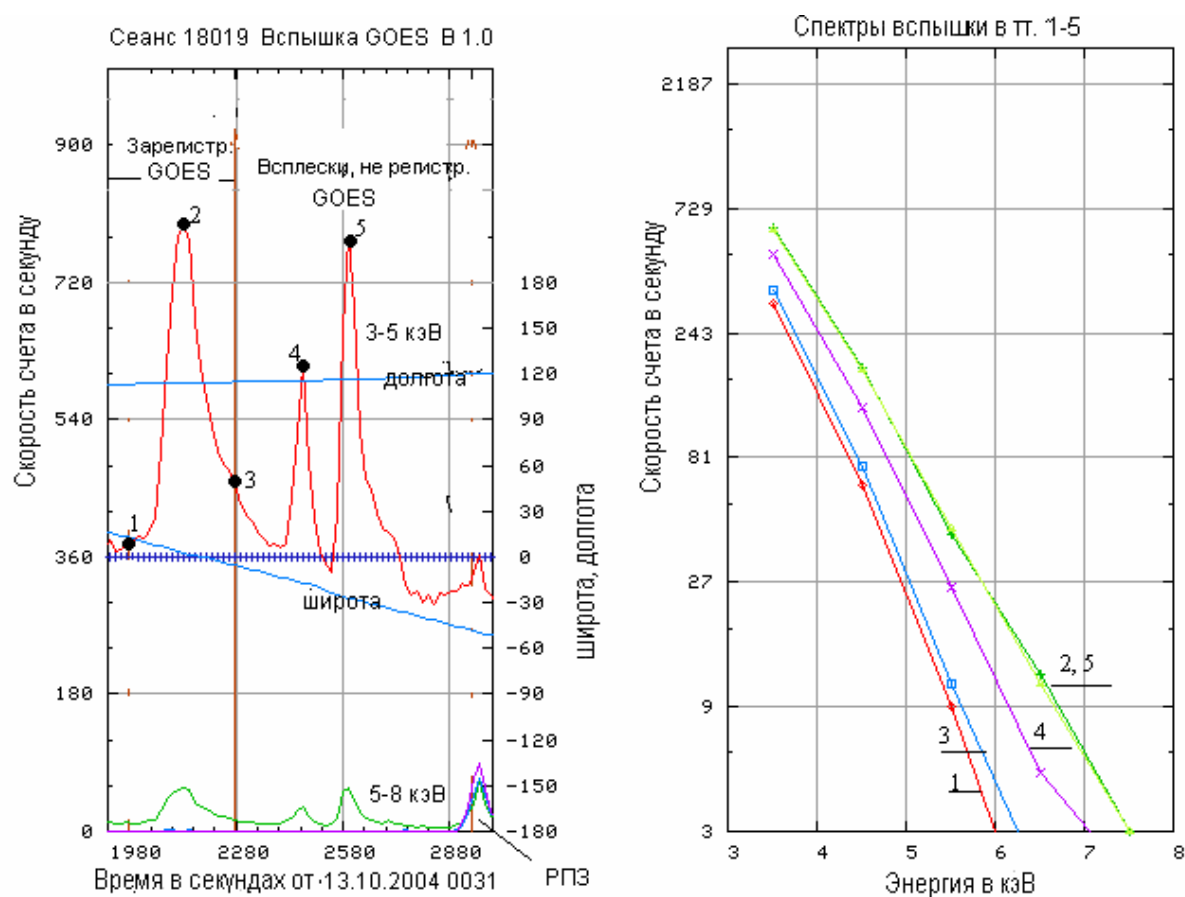


Рис. 15. Временные профили в энергетических интервалах 3–5, 5–8 кэВ (GOES), и спектры в точках 1–5 трех вспышек, зарегистрированных 13.10.2004 г. (РПС-1/КОРОНАС-Ф)

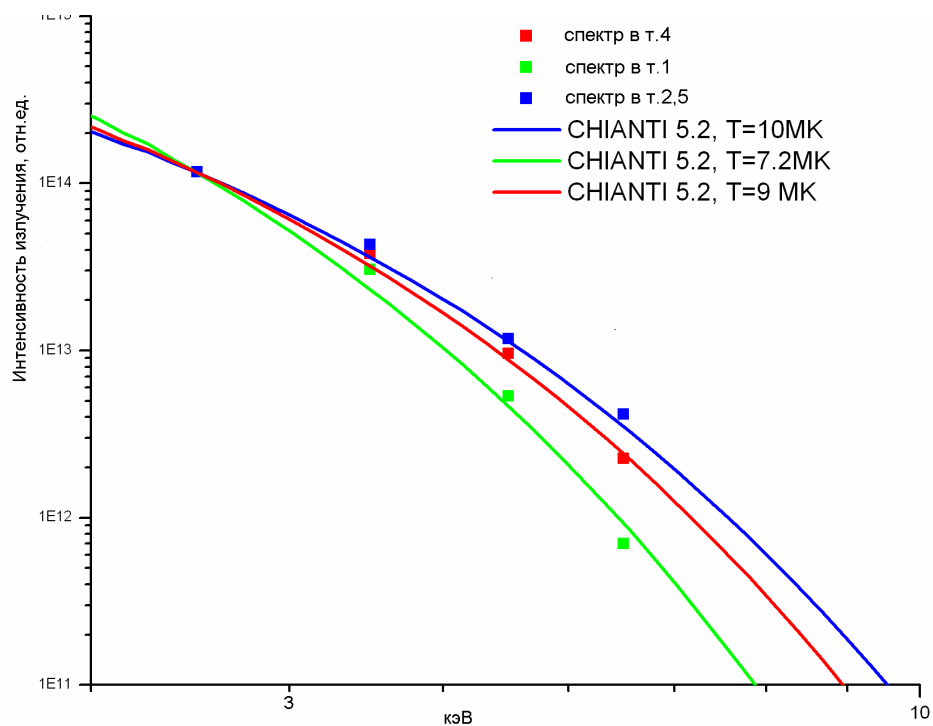


Рис. 16. Сравнение спектров на рис. 15 с моделью CHIANTI 5.2

На рис. 15 приведены временные профили трех вспышек и их спектры в точках 1–5. Вспышки зарегистрированы 13.10.2004 г. при низком уровне фонового излучения (т. 1). Первое возмущение было классифицировано GOES как слабая вспышка B1.0, а два последующих в каталог не попали. Поскольку скорости счета сигналов в максимумах первой и третьей вспышек (каналы 3–5 и 5–8 кэВ) практически одинаковы (т. 2, 5), а их спектры совпадают, то третью вспышку можно также отнести к классу B1.0. Вторая заведомо более слабая вспышка может быть отнесена к классу A с потоком в максимуме $<10^{-7}$ Вт/м². Температура в источнике для каждой из этих трех вспышек была определена сравнением формы измеренных спектров со спектрами, рассчитанными по модели CHIANTI 5.2 (рис. 16). Вероятно, этим трем вспышкам соответствовали быстрые и заметные изменения температуры (от 9 до 10 МК) в одном и том же источнике.

На рис. 17 показаны временные профили и спектры в т. 1–3 более мощной вспышки класса B7.6 зарегистрированной 21.08.2003 г. Вспышка произошла при более высоком и более жестком фоновом излучении Солнца (точка 1), чем вспышка на рис. 15. Вспышка имела длительный характерный («ступенькой») спад, спектр в максимуме (т. 2) значительно более жесткий, чем у вспышки B.1.0 (рис. 15, т. 2).

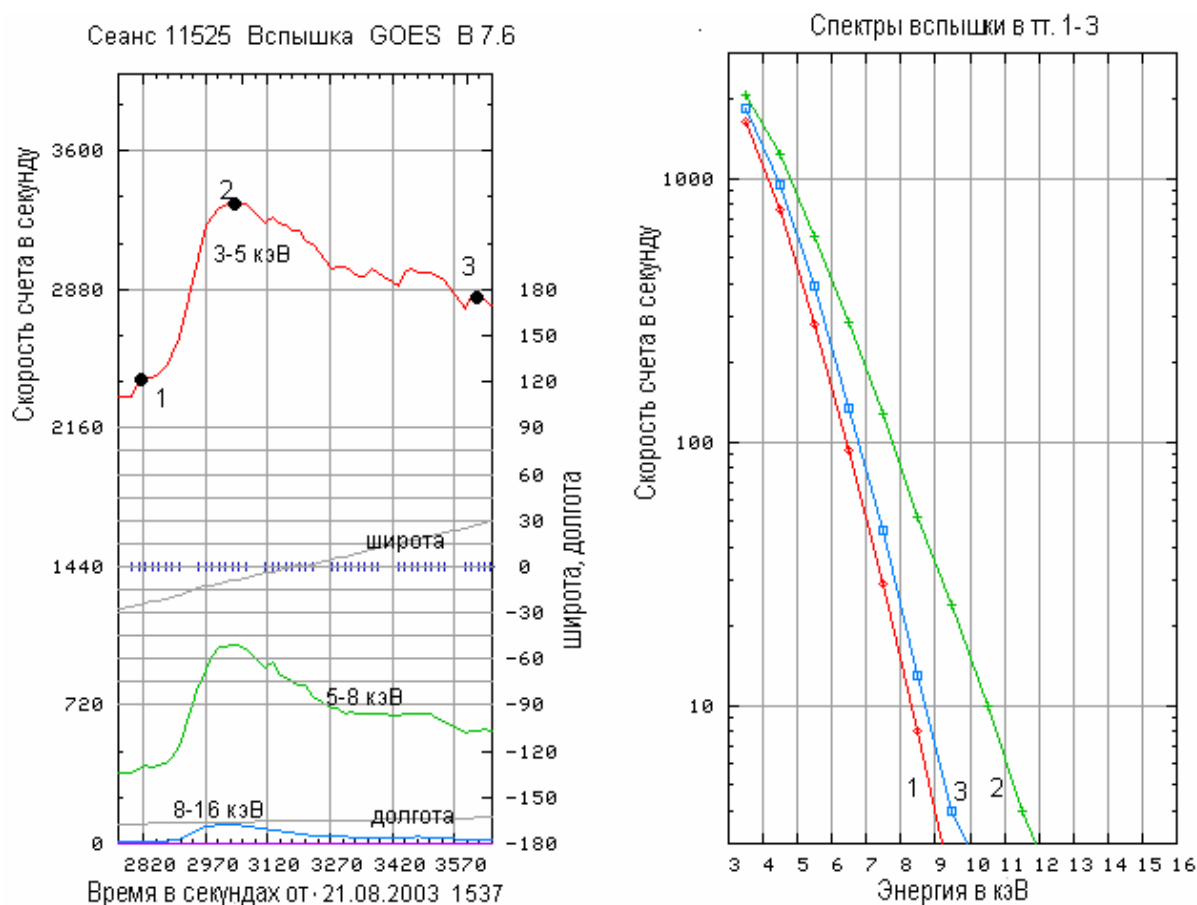


Рис. 17. Временные профили в энергетических интервалах 3–5, 5–8, 8–6 кэВ (GOES), и спектры в точках 1–3 вспышки класса B7.6, зарегистрированной 21.08.2003 г. (РПС-1/КОРОНАС-Ф)

По мере спада солнечной активности в 23-м цикле, вспышки наблюдались на все более низком уровне фонового солнечного излучения. На рис. 18 приведены временные профили и спектры вспышки класса B9.5, зарегистрированной 02.05.2005 г. На этом же рисунке отмечены начало максимум и конец вспышки по GOES (т. 1, 3, 4). Окончание вспышки РПС-1 не зафиксировал, поскольку ИСЗ зашел в тень Земли. Максимальная энергия квантов, зарегистрированных в этой вспышке (спектр т. 3), превосходила верхнюю границу спектрального диапазона GOES.

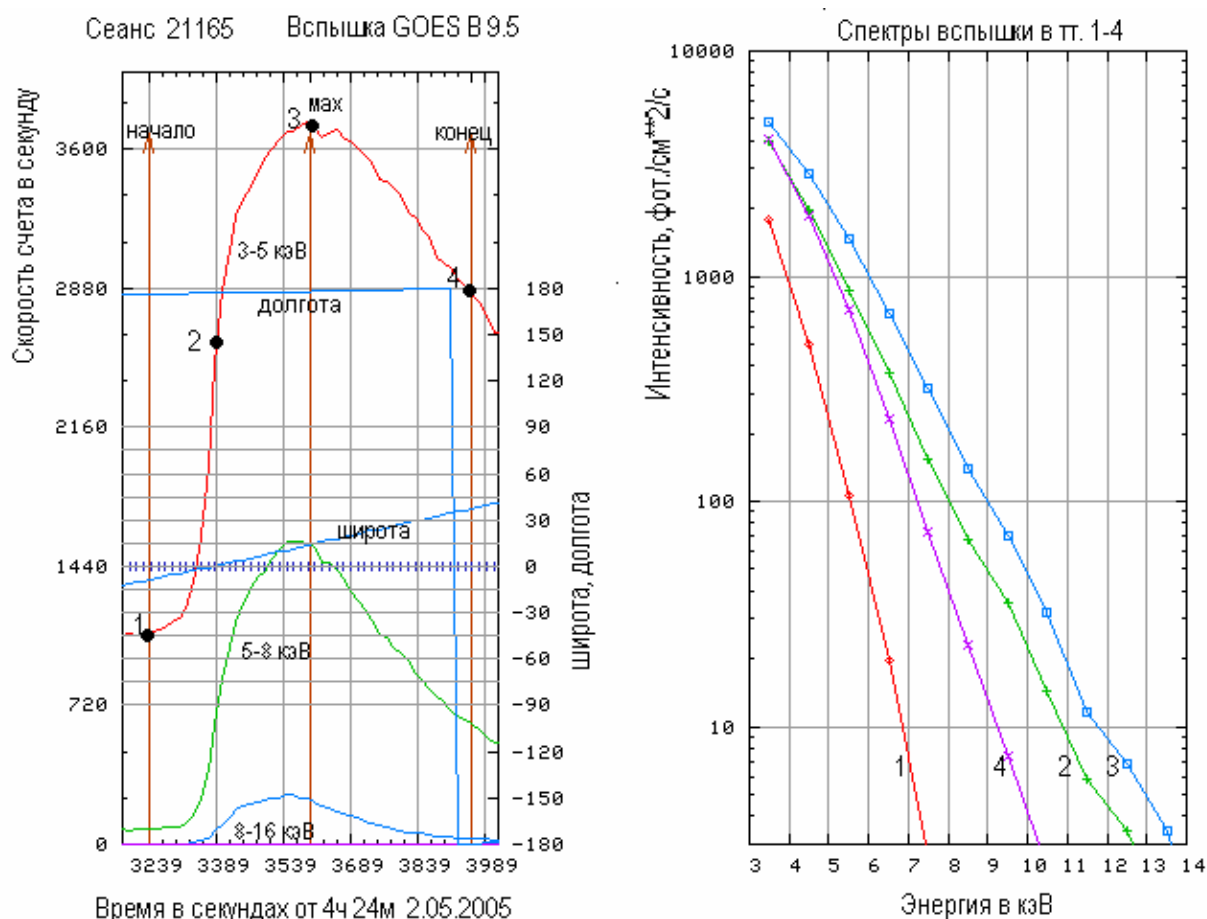


Рис. 18. Временные профили в энергетических интервалах 3–5, 5–8, 8–16 кэВ (GOES), и спектры в точках 1–4 вспышки класса B9.5, зарегистрированной 02.05.2005 г. (РПС-1/КОРОНАС-Ф)

На рис. 19 представлена еще более мощная вспышка C1.2 ($1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$), которая произошла 08.11.2005 г. также при относительно низком фоне. На рис. 19 отмечены начало, максимум и конец вспышки по GOES, хотя РПС-1 не зафиксировал ее окончание из-за попадания ИСЗ в тень Земли. Вспышка имеет два максимума, причем спектр второго максимума был более жестким, чем первого. Возрастание в более высоком энергетическом интервале (8–16 кэВ) началось примерно через 1 мин после начала вспышки. Во втором возрастании наблюдается одновременный приход мягкого и более жесткого рентгена.

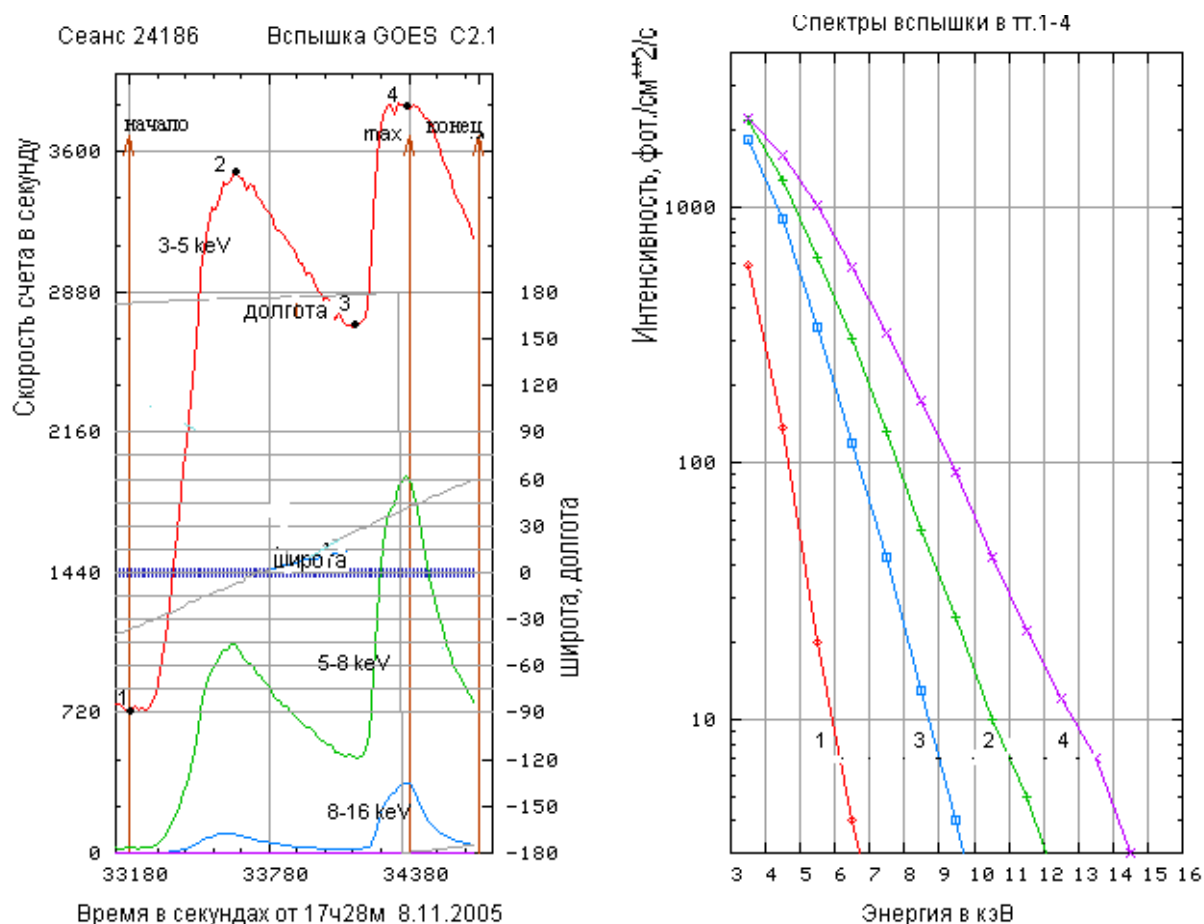


Рис. 19. Временные профили в энергетических интервалах 3–5, 5–8, 8–16 кэВ (GOES), и спектры в точках 1–4 вспышки класса C1.2, зарегистрированной 08.11.2005 г. (РПС-1/КОРОНАС-Ф)

Свечение верхней ночной атмосферы Земли

Во время нахождения КОРОНАС-Ф в тени Земли прибор РПС-1 регистрировал мягкое рентгеновское излучение верхней ночной атмосферы, а также сигналы от энергичных заряженных частиц, попадавших в него при прохождении радиационных поясов Земли (РПЗ) в области высоких широт и Бразильской магнитной аномалии (БМА). Рентгеновское излучение верхней атмосферы Земли по своей природе вторично. В рассматриваемом диапазоне энергий оно, в основном, обусловлено тормозным излучением потоков электронов, высыпаящихся из магнитосферы. Долговременные и высокочувствительные наблюдения ночной атмосферы (07.2001–12.2005), проведенные с помощью РПС-1, позволили получить представления о глобальном излучении в виде карт Земли в «рентгеновских лучах», а также его сезонной зависимости.

На рис. 20 представлены карты излучения ночной атмосферы, полученные за год с 23.03.2002 г. по 23.03.2003 г. в интервалах энергий 3–5; 5–8; 8–16 и 16–31,5 кэВ и за периоды северного лета 23.03.2002–23.09.2002 (рис. 21) и зимы 23.09.2002–23.03.2003 (рис. 22).

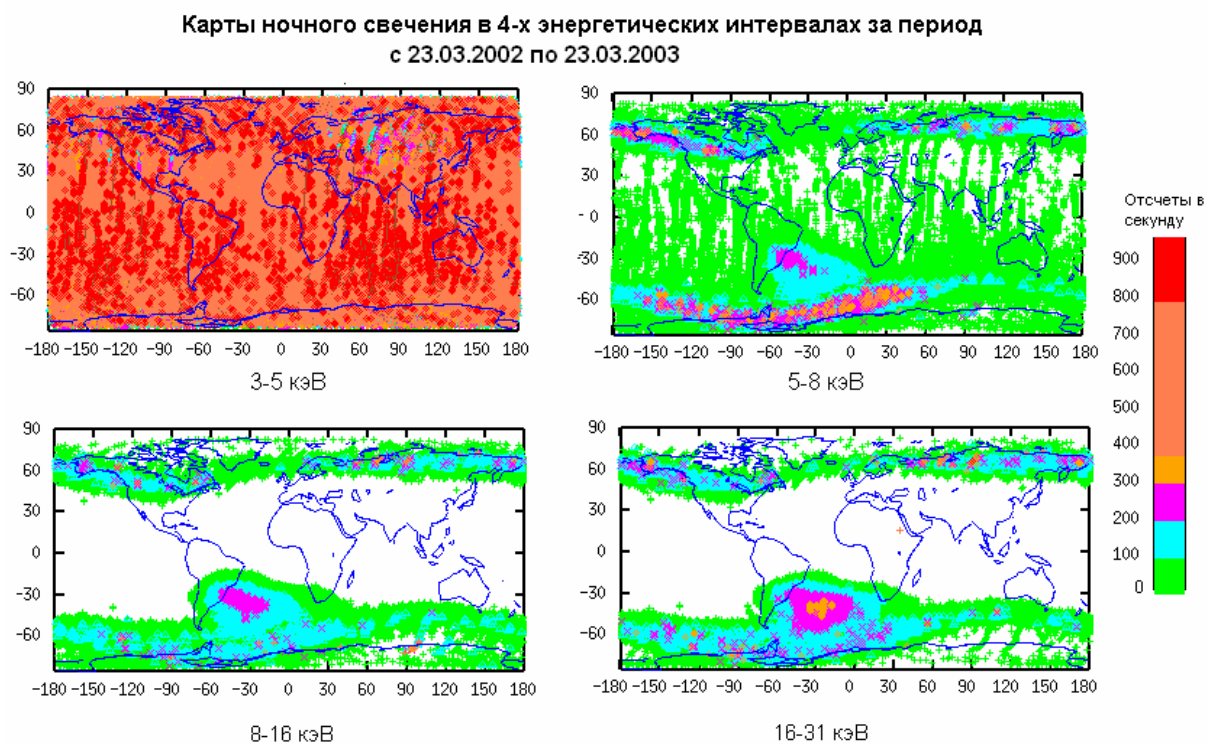


Рис. 20. Карты свечения ночной атмосферы Земли, построенные в энергетических интервалах 3–5, 5–8, 8–16 и 16–31 кэВ по информации, полученной с 23.03.2002 по 23.03.2003 г. (РПС-1/КОРОНАС-Ф)

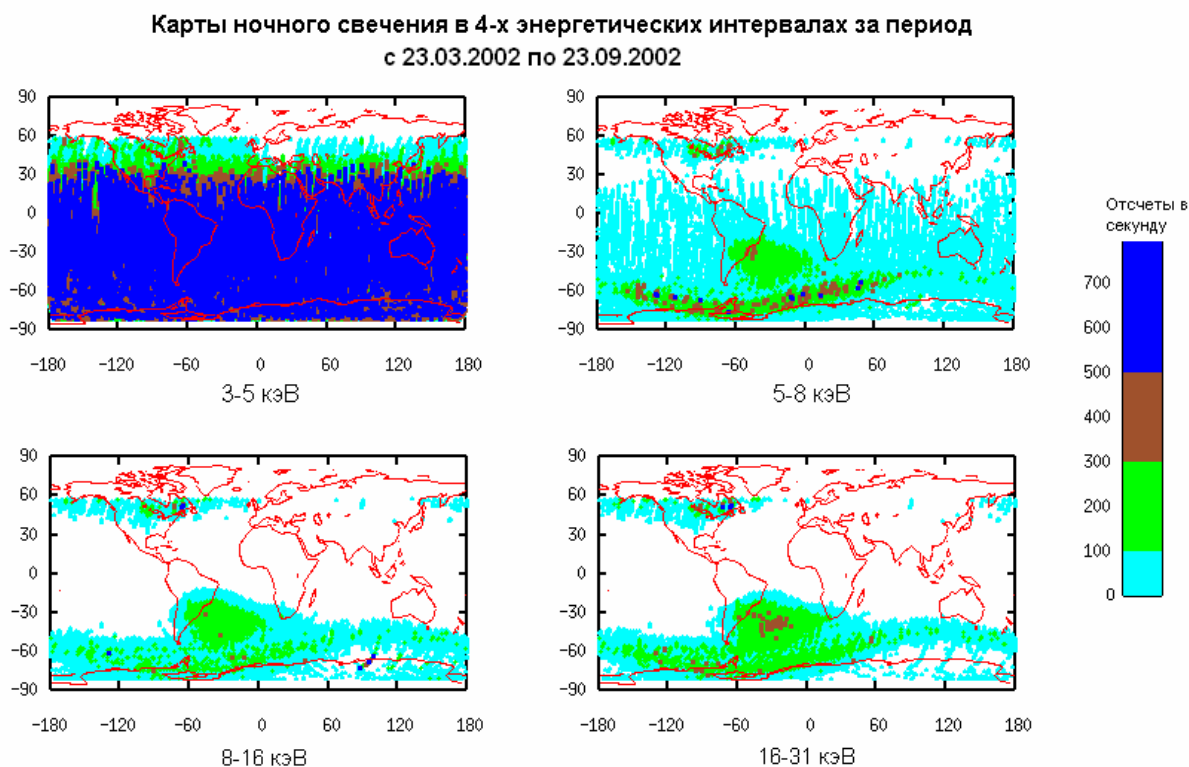


Рис. 21. Карты свечения ночной атмосферы Земли, построенные в энергетических интервалах 3–5, 5–8, 8–16 и 16–31 кэВ по информации, полученной с 23.03.2002 по 23.09.2002 (лето в северном полушарии) (РПС-1/КОРОНАС-Ф)

Рис. 20 показывает, что интенсивность излучения ночной атмосферы падает с увеличением энергии квантов. В диапазоне энергий 3–5 кэВ светится вся ночная атмосфера, причем наиболее ярко в южном полушарии в областях Тихого и Индийского океанов. В северном полушарии наиболее яркое свечение наблюдается в высоких широтах. На более низких широтах интенсивность свечения слабеет и в отдельных областях на карте 5–8 кэВ отсутствует вообще. При энергии >8 кэВ прибор регистрирует сигналы только в районах РПЗ, границы которых четко просматриваются на картах для 8–16 и 16–31 кэВ.

Наблюдались сезонные особенности свечения атмосферы в разных ее районах: на картах 3–5 кэВ видны границы полярного дня в течение лета (рис. 21) и зимы (рис. 22). Летом свечение ночной атмосферы в 3–5 кэВ на 30–60° с.ш. намного слабее, чем от ее остальной части.

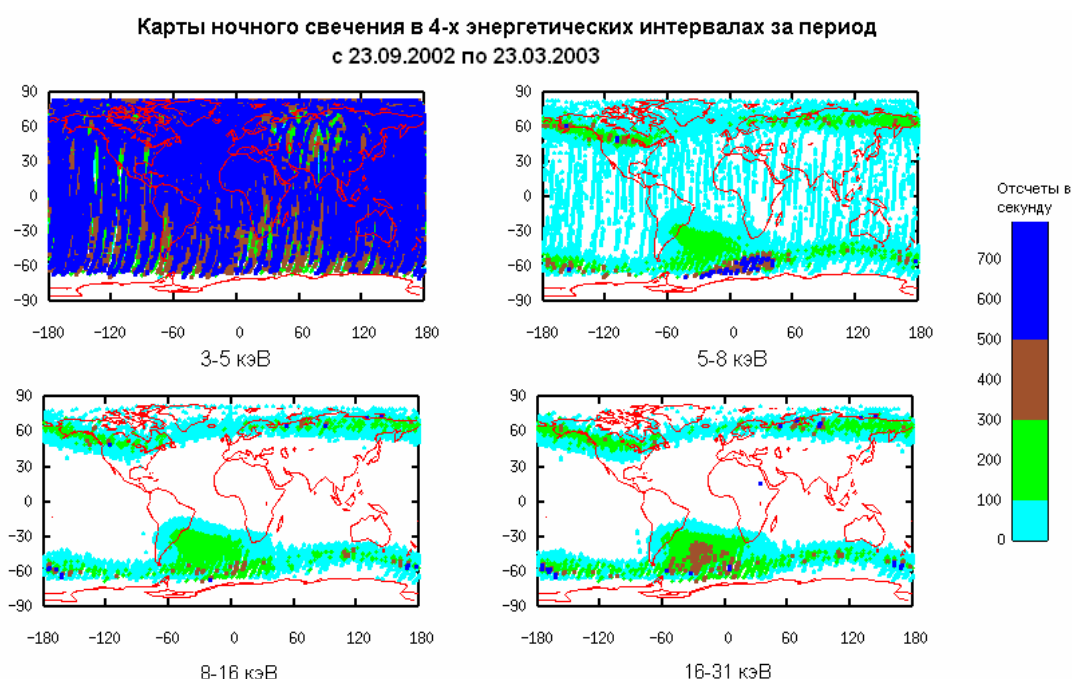


Рис. 22. Карты свечения ночной атмосферы Земли, построенные в энергетических интервалах 3–5, 5–8, 8–16 и 16–31 кэВ по информации, полученной с 23.09.2002 по 23.03.2003 г. (зима в северном полушарии) (РПС-1/КОРОНАС-Ф).

На картах рис. 21 в диапазонах 5–8; 8–16 и 16–31 кэВ (северное лето 2002 г.) уменьшение интенсивности излучения от РПЗ в северном полушарии от Атлантики до Чукотки видно как «разрыв» РПЗ. Летом максимум РПЗ на высоте 500 км на этих долготах находится в области полярного дня и поэтому не виден на карте рис. 20, однако, области с меньшей интенсивностью могли бы быть видны. «Разрыв» не наблюдается зимой (рис. 22), а ближе к минимуму солнечной активности отсутствует даже летом 2004 г. В южном полушарии никакого «разрыва» при смене сезона не обнаружено. Наблюдаемый эффект, возможно, объясняется высоким уровнем солнечной активности, при котором повышается плотность верхней

атмосферы, что вместе с сезонным разогревом атмосферы приводит к уменьшению потоков частиц РПЗ. Слабое свечение с энергией <5 кэВ в области «разрыва» (рис. 21), вероятно, обусловлено галактическими космическими лучами.

Заключение

Таким образом, в ходе эксперимента РПС-1/КОРОНАС-Ф впервые получены детальные спектрально–временные характеристики слабых солнечных рентгеновских вспышек, что позволило более точно определять температуру в источнике, путем сравнения измеренных спектров с рассчитанными по современным моделям, таким как CHIANTI 5.2. Установлены количественные характеристики увеличения жесткости спектров фонового солнечного рентгена с ростом солнечной активности.

Наблюдения ночной атмосферы Земли показали, что в диапазоне энергий 3–5 кэВ светится вся ночная атмосфера, в диапазоне 5–8 кэВ существуют районы, где свечение отсутствует, при >8 кэВ светятся только зоны радиационных поясов Земли (РПЗ). Летом 2002 г. в северном полушарии от Атлантики до Чукотки наблюдалось уменьшение светимости от РПЗ.

2.1.2.2. Экспериментальный малый космический аппарат МКА «Вулкан-Компас-2» — итоги летных испытаний

Экспериментальный космический аппарат МКА «Вулкан-Компас-2» был создан в рамках Федеральной космической программы России и, являясь пилотным проектом серии космических аппаратов, предназначался для проведения космических экспериментов по исследованию возможности обнаружения предвестников сильных землетрясений в интересах создания космической системы для мониторинга природных и техногенных катастроф. Основной целью запуска микроспутника были испытания и отработка всех основных элементов космической системы.



Рис. 1. Малый космический аппарат «Компас-2» в полете

В процессе реализации этого пилотного проекта должна была быть испытана вновь разработанная целевая научная аппаратура, режимы ее работы и характеристики, методика сбора, обработки и анализа информации в режиме реального времени, а также новые служебные системы микроспутника — центральный бортовой процессор, аппаратура радиоканалов телеметрии и радиоуправления, система ориентации, система обеспечения теплового режима и система электроснабжения.

В реализации проекта принимали участие: «Конструкторское бюро им. акад. В.П. Макеева Государственного ракетного центра» — в части ракетно-космического комплекса (спутниковая платформа «Компас-2» и конверсионная ракета РСМ-54 («Штиль»), старт с подводной лодки из акватории Баренцева моря); Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) им. Н.В. Пушкова Российской академии наук — в части научно-методической разработки проекта и поставки бортовой научной аппаратуры с участием международной кооперации (Украина, Венгрия, Польша, Швеция).

Экспериментальный малый космический аппарат МКА «Вулкан-Компас-2» 26 мая 2006 г. был выведен на околоземную орбиту с наклоном $78,90^\circ$, апогеем 519,0 км, перигеем 412,3 км и периодом обращения 93,59 мин. Общая масса МКА — 80 кг (в т. ч. масса НА — 20 кг). Габариты МКА в сложенном состоянии — $1694 \times 766 \times 500$ мм. Запуск спутника осуществлен ракетой-носителем «Штиль» на базе конверсионной переоборудованной морской ракеты РСМ-54 (подводный старт).

Летные испытания МКА были завершены в июле 2007 года.

Комплекс научной аппаратуры включал в себя пять научных приборов, предназначенных для мониторинга околоземного космического пространства с целью обнаружения и регистрации аномальных физических явлений в атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли, возникающих в результате сейсмической активности, а также техногенных катастроф.

Состав научной аппаратуры МКА «Компас-2»:

- двухчастотный (1,2 и 1,5 ГГц) GPS-приемник аппаратуры спутниковой навигации (АСН), предназначенный для глобального мониторинга ионосферы-атмосферы методом радиозатменного просвечивания;
- двухчастотный передатчик RBE 150/400 «Маяк», предназначенный для проведения радиотомографической реконструкции ионосферы и локальных аномалий ионосферы;
- радиочастотный анализатор в диапазоне частот (100 кГц – 15 МГц) РЧА (RFA), предназначенный для регистрации плазменных частот в ионосфере, через которые определяются основные параметры локальной плазмы в окрестностях КА;
- низкочастотный волновой анализатор ОНЧ/КНЧ в диапазоне частот 0,1–20 кГц, предназначенный для регистрации и анализа аномальных низкочастотных шумов в ОКП, связанных с сейсмической активностью;

- детектор радиации и ультрафиолета ДРФ «DRF», предназначенный для измерений электронов и протонов радиационных поясов Земли и космических лучей, а также ультрафиолетового излучения верхней атмосферы Земли.

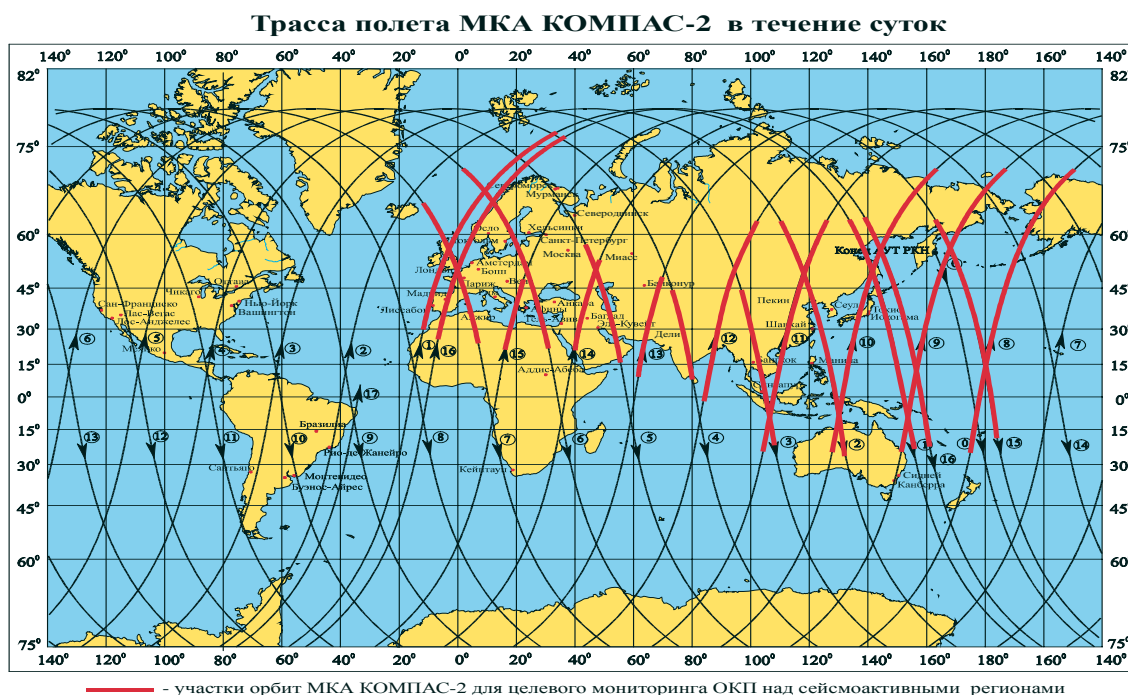


Рис. 2. Траектория орбит МКА «Компас-2» над сейсмоактивными регионами мира

В течение суток трасса полета МКА «Компас-2» неоднократно пересекала регионы с повышенной сейсмоактивностью (рис. 2). Именно над этими регионами в первую очередь включалась научная аппаратура с целью проведения измерений и регистрации аномальных явлений. Как видно, измерениями могли быть охвачены практически все сейсмоопасные регионы земного шара.

Результаты летных испытаний КНА МКА «Вулкан-Компас-2»

В процессе летных испытаний платформы МКА «Компас-2» были выявлены проблемы и значительные ограничения ее опытной эксплуатации, связанные с нештатным функционированием служебных систем МКА — канала радиоуправления и системы энергоснабжения. Эти ограничения не позволили обеспечить необходимые условия выполнения целевых задач приборами в полном объеме. Несмотря на эти ограничения, основные задачи отработки приборов комплекса научной аппаратуры в рамках летных испытаний экспериментального КА были решены. Были проверены и подтверждены основные характеристики научных приборов. Выполнено несколько циклов измерений и мониторинга параметров околоземного космического пространства над сейсмоактивными регионами. В процессе летных испытаний и опытной эксплуатации приборов комплекса научной аппаратуры МКА были получены данные измерений фоновое состояние

ионосферы, зарегистрированы явления мощной грозовой активности в верхней атмосфере, в околоземном космическом пространстве зарегистрированы потоки ускоренных протонов и электронов, связанные с солнечной активностью во время крупной геомагнитной бури 15 декабря 2006 г., выполнено позиционирование МКА с помощью прибора АСН по сигналам GPS, осуществлена регистрация свистящих атмосфериков, зарегистрированы прохождение сильных атмосфериков от поверхности Земли к спутнику по короткому пути (частично-диспергированные СА), уширение спектра СДВ-станций, зарегистрированы сигналы атмосфериков, сопутствующие сейсмоактивным процессам.

Ниже приведены некоторые результаты испытаний и измерений каждого из приборов комплекса.

С помощью прибора АСН было осуществлено позиционирование МКА и продемонстрирована практическая возможность использования бортового двухчастотного GPS-приемника для определения орбитальных данных КА и временной привязки данных измерений с высокой точностью при проведении уникальных синхронных экспериментов с наземными и орбитальными средствами в единой системе времени.

Включения двухчастотного передатчика RBE 150/400 «Маяк» были проведены в нештатной ориентации МКА, что позволило сделать качественную оценку штатного функционирования прибора, но не позволило провести радиотомографические измерения профиля ионосферы.

На рис. 3–7 показаны измерения, полученные прибором РЧА для разных интервалов времени.

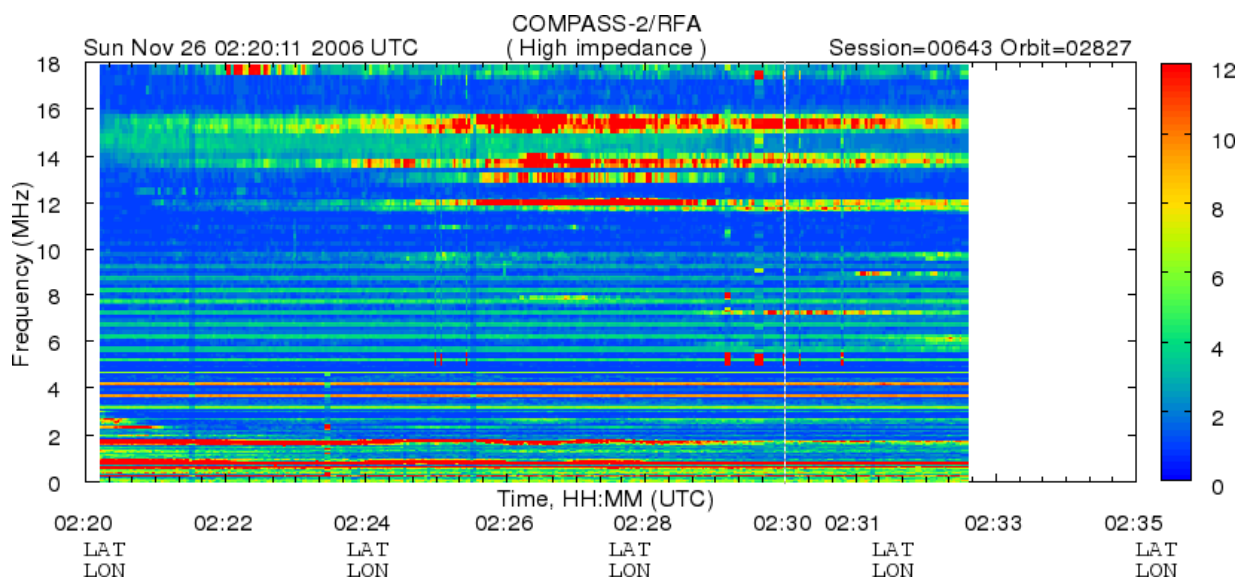


Рис. 3. Радиочастотный динамический спектр плазменных излучений в ионосфере, измеренный прибором РЧА/Компас-2. По оси x отложено время, по оси y — частота излучения, цвет дает представление об интенсивности излучения. Спектр содержит информацию о параметрах ионосферы и происходящих в ней явлениях

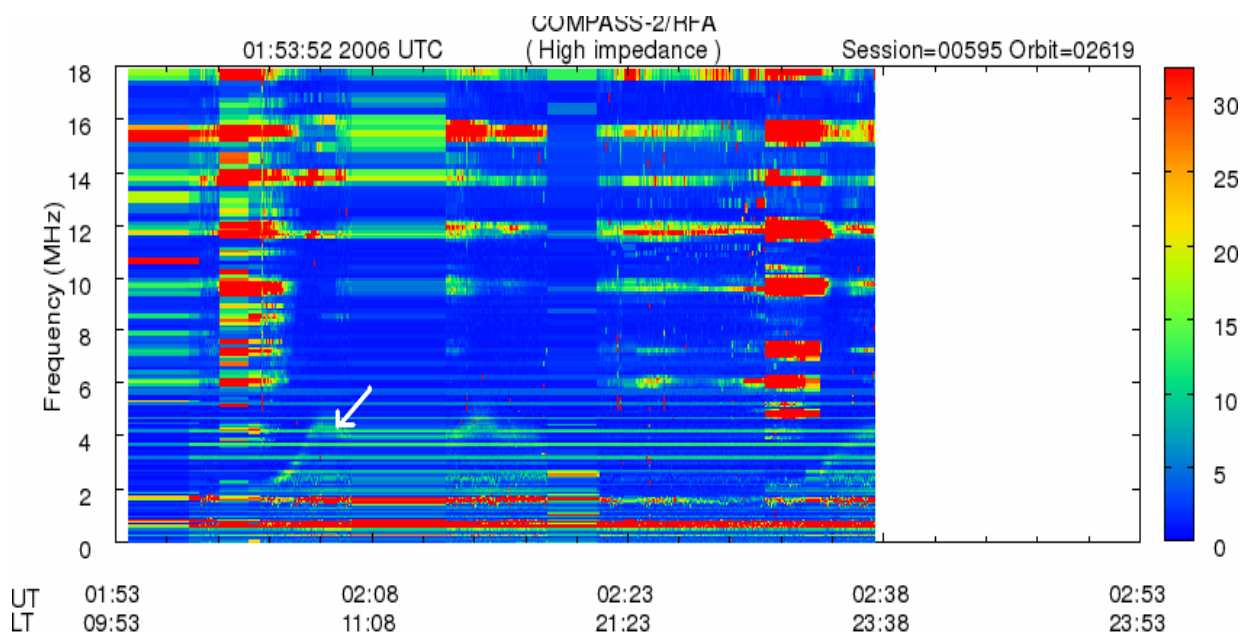


Рис. 4. Пример динамического спектра, полученного прибором РЧА при пролете над областью экваториальной аномалии. В частотном диапазоне 2–4 МГц хорошо различим резонанс (зеленый цвет, указано стрелкой) на локальной плазменной частоте

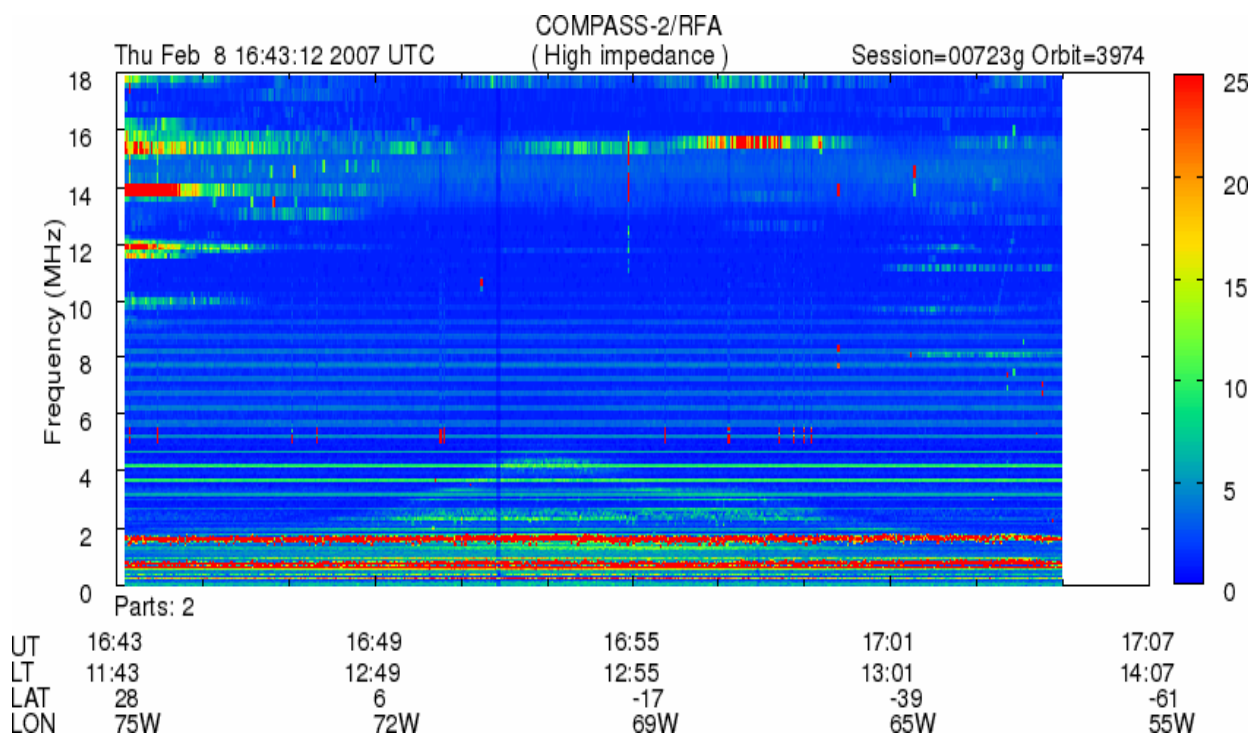


Рис. 5. Растянутое представление динамического спектра плазменных излучений, зарегистрированных при пролете над западным побережьем Южной Америки 8 февраля 2007 г.

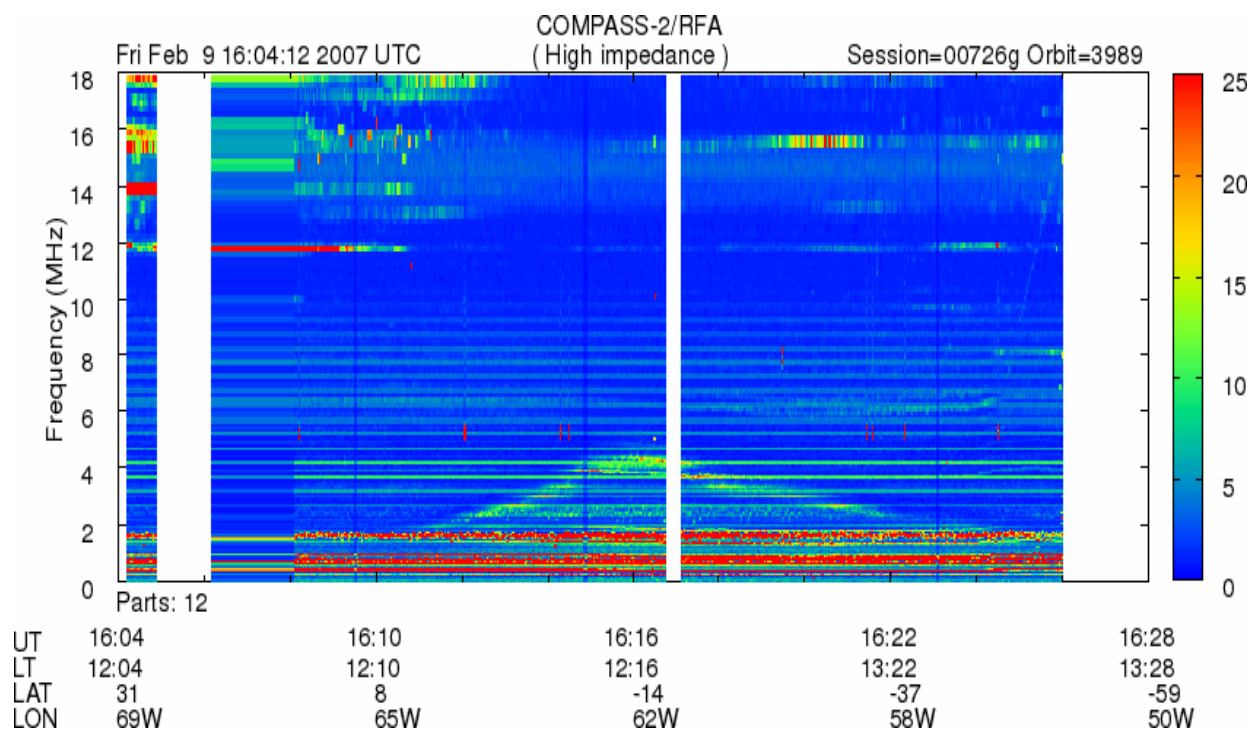


Рис. 6. Плазменные резонансы, зарегистрированные на частотах 2–4 МГц прибором РЧА над областью экваториальной аномалии 9 февраля 2007 г.

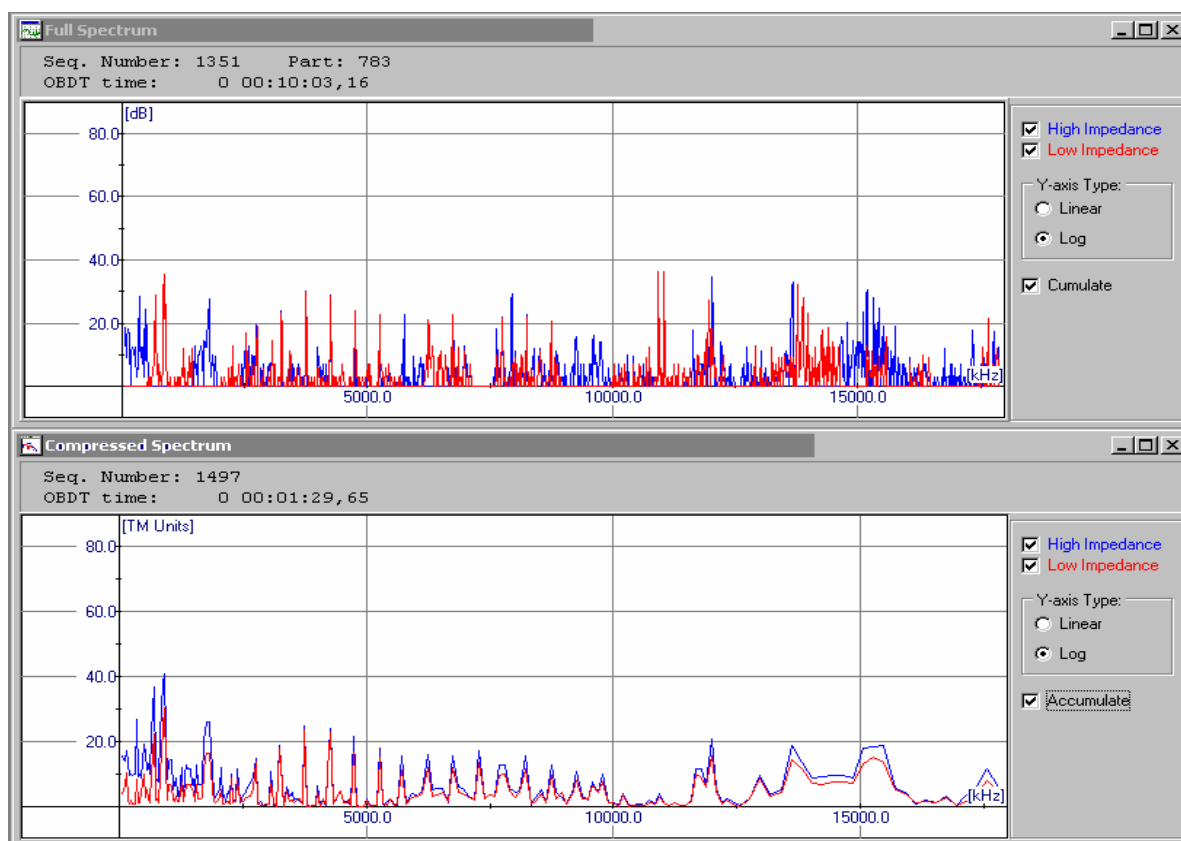


Рис. 7. Амплитудный спектр радиоизлучения, полученный прибором РЧА. Видны пики излучения на фиксированных частотах, отвечающих характерным плазменным частотам ионосферы

Датчик радиации и ультрафиолета ДРФ регистрировал энергичные частицы и различного рода свечения. Проводимые им измерения позволяли контролировать геофизическую обстановку вдоль орбиты спутника, которая весьма важна для интерпретации данных и выделения фоновых и аномальных событий. На рис. 8. приведен пример измерений энергичных частиц. Наряду с измерениями фонового уровня радиации вдоль орбиты, видны моменты вхождения спутника в полярные шапки и связанные с этим повышения уровня радиации (рис. 8–10).

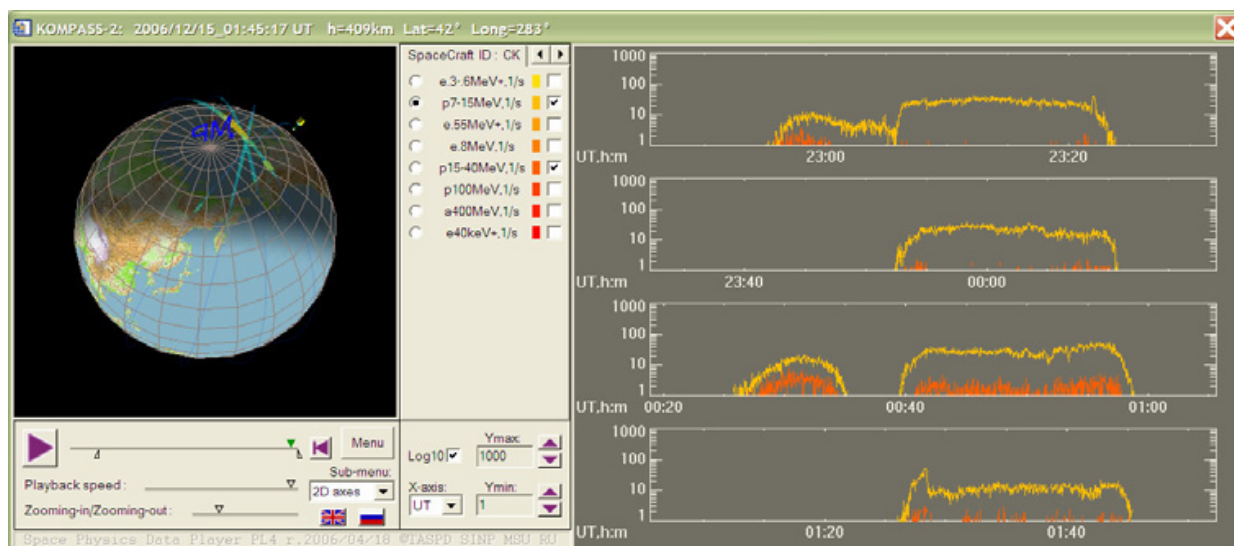


Рис. 8. Пример регистрации прибором ДРФ потоков заряженных частиц 15 декабря 2006 г. в период геомагнитной суббури. Слева - вид Земли со стороны северного полюса

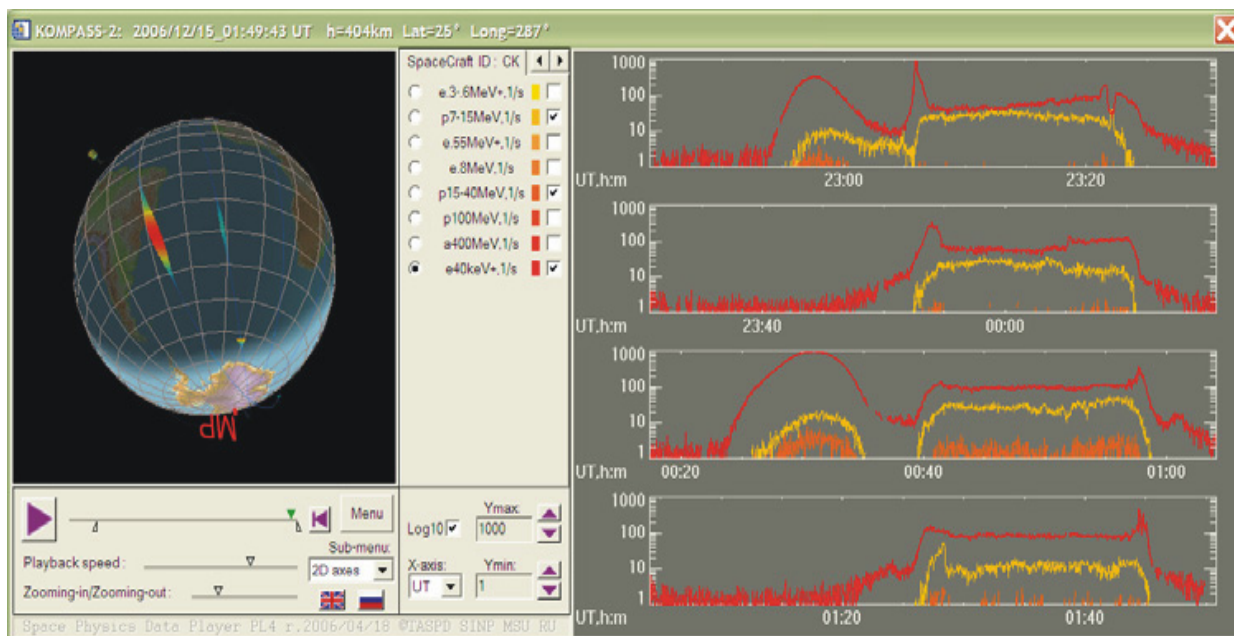


Рис. 9. Слева — вид Земли со стороны южного полюса. Справа — регистрация прибором ДРФ потоков заряженных частиц (протонов 7–15 МэВ) и регистрация в канале газоразрядного счётчика (красный цвет) в период геомагнитной бури 15 декабря 2006 г.

В правой части рис. 8 жёлтым и оранжевым цветом показаны результаты измерений потоков протонов с энергией 7–15 МэВ и 15–40 МэВ при четырёх последовательных пролётах через южную и северную полярные шапки Земли. По оси X — мировое время UT, по оси Y — логарифм скорости счёта детектора. Платообразные кривые говорят о доступе частиц указанных энергий извне вглубь магнитосферы (до высот 400–450 км) вдоль по квазиразомкнутым силовым линиям магнитного поля, связанным с полярными областями. Регистрируемые протоны были ускорены и попали в окрестность Земли в результате солнечных вспышек 13 и 14 декабря 2006 г. Возрастания слева от полярного плато (на первом и третьем графиках) соответствуют прохождению спутником области Южно-Атлантической магнитной аномалии.

Рисунок 9 аналогичен предыдущему, но, дополнительно, красным цветом приведена регистрация в канале газоразрядного счётчика. На предпоследнем графике рис. 9 виден повышенный уровень протонов 15–40 МэВ, вероятно связанный с приходом частиц от вспышки 14 декабря 2006 г. На левой панели рис. 9 показана Земля со стороны южного полюса с индикацией значительных потоков радиации над Атлантическим побережьем Бразилии.

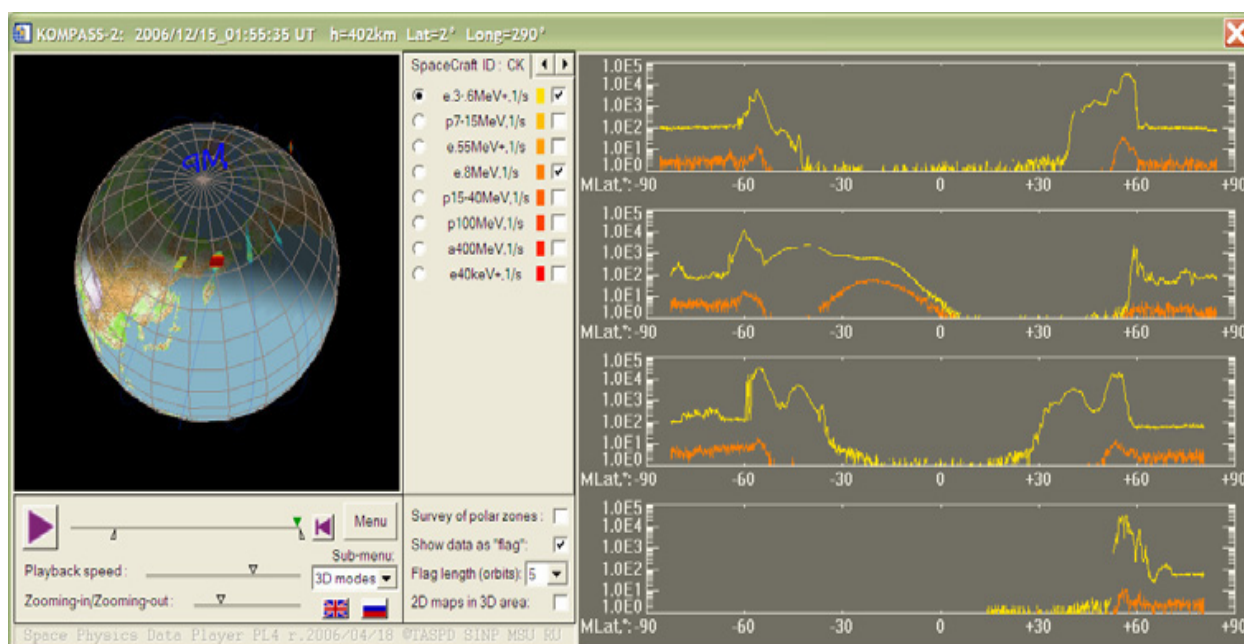


Рис. 10. Пример регистрации прибором ДРФ потоков заряженных частиц 15 декабря 2006 г. в период геомагнитной суббури. Слева — вид Земли со стороны северного полюса

На рис. 11–12 показаны осциллограммы, зарегистрированные на ночной стороне Земли с помощью датчика ультрафиолета ДРФ.

На рис. 13–22 приведены результаты измерений, полученные низкочастотным волновым комплексом (НВК).

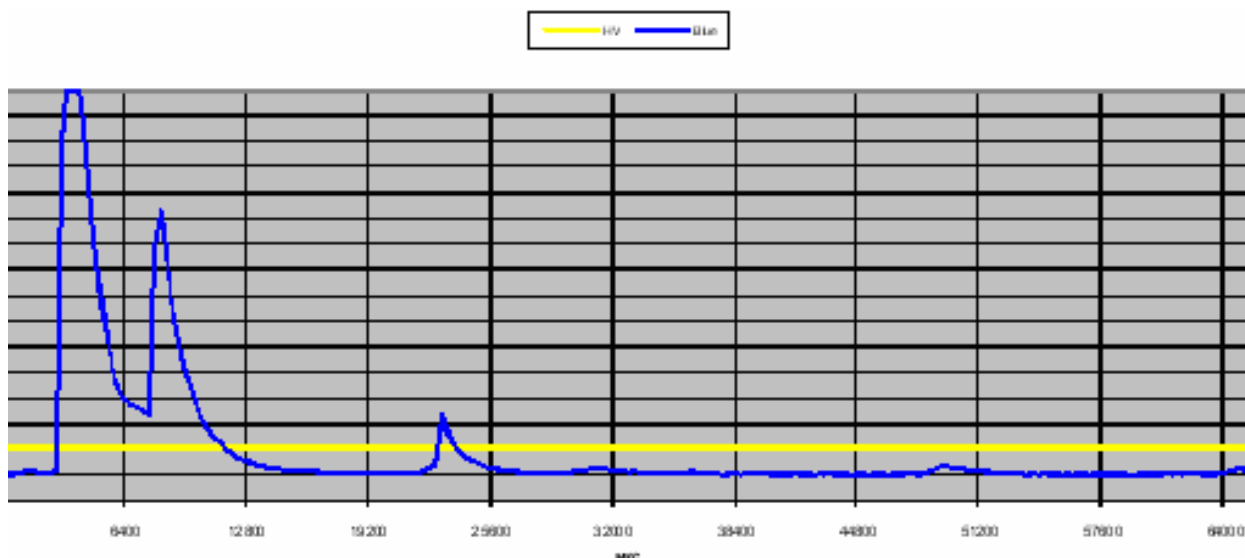


Рис. 11. На осциллограмме — мощное грозное явление над Кенией, зарегистрированное на ночной стороне Земли с помощью датчика ультрафиолета в 21:04:41 UT 02.12.2006 г. Двойной начальный импульс, по-видимому, два почти одновременных разряда

57 с.ш. 1,8 з.д. 22:21:29 02.12.2006 DUAL

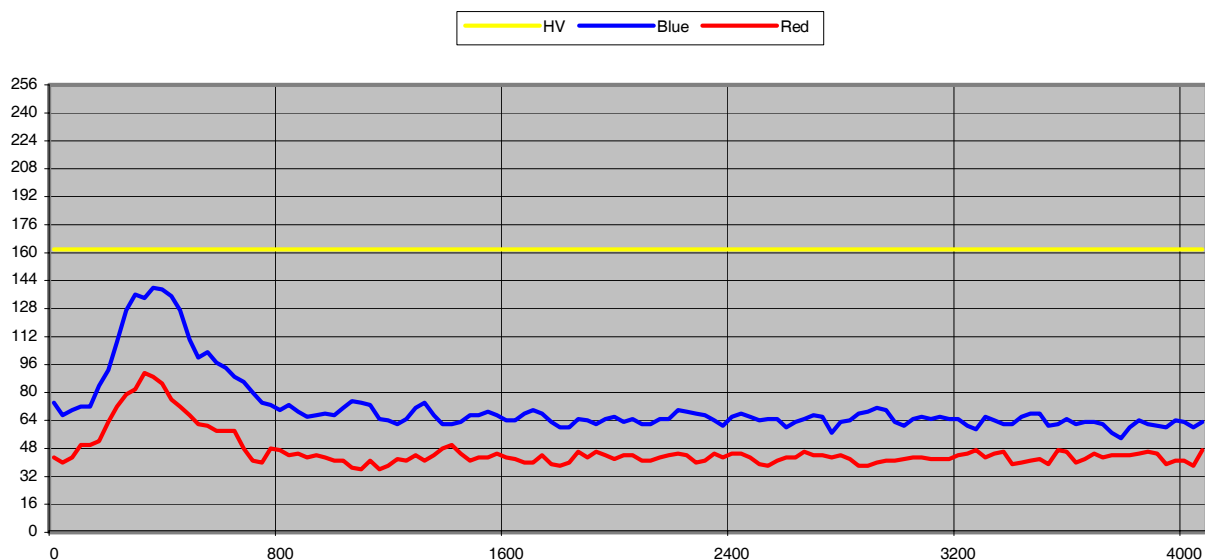


Рис. 12. Осциллограммы излучений, зарегистрированных на ночной стороне Земли с помощью датчика ультрафиолета ДРФ в 22:21:29 UT 02.12.2006 г. На осциллограмме показаны измерения в каналах ультрафиолета (синяя кривая) и красного диапазона длин волн (красная кривая) — быстрое оптическое явление, зарегистрированное над Шотландией в 22:21:29 UT 02.12.2006 г.

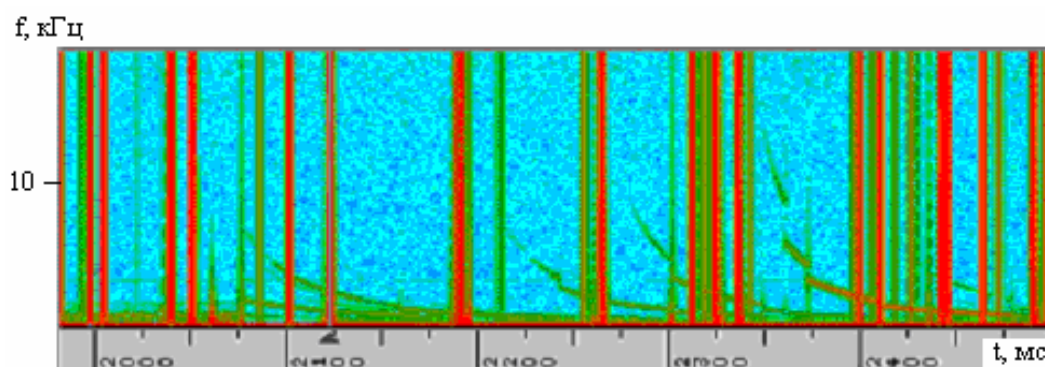


Рис. 13. Пример измерения, выполненного низкочастотным волновым комплексом в диапазоне очень низких частот (около 10 кГц). Это так называемая сонограмма, или такой же динамический спектр излучения, как и для прибора РЧА, только в диапазоне низких частот. По оси x отложено время, по оси y - частота излучения, цвет дает представление об интенсивности излучения. Видны треки, которые связаны с распространением свистовых волн в ионосфере

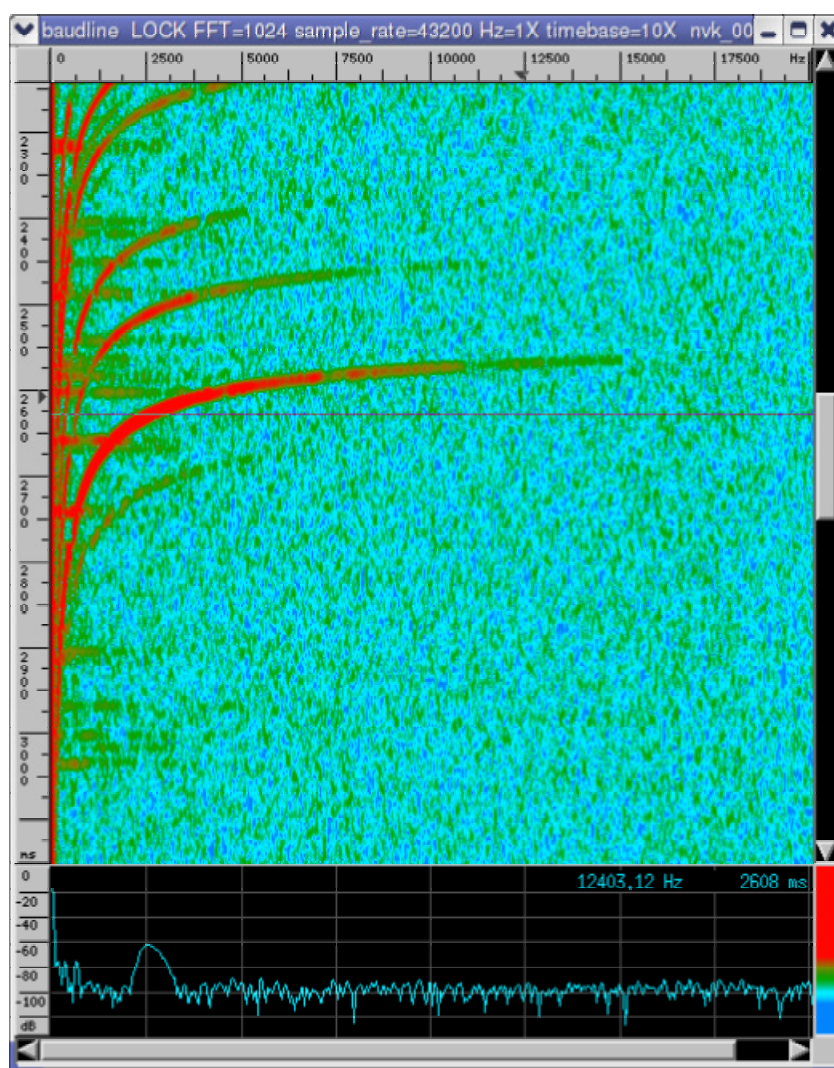


Рис. 14. Показан образец записи, полученной на борту спутника прибором НВК. Верхний фрагмент представляет собой динамический спектр, т.е. последовательность Фурье спектров временных реализаций длительностью ~20 мс, сдвинутых на ~0,2 мс. Масштаб по времени — мс, по частоте — Гц.

На спектрограмме видны следы дискретных сигналов с частотой, уменьшающейся со временем. Шкала интенсивности следов показана справа на нижнем фрагменте. Длительность сигналов ~200–400 мс. Это так называемые частично-диспергированные свистящие атмосферерики, генерируемые молниевыми разрядами в волноводе Земля – нижняя ионосфера и распространяющиеся до высоты спутника по короткому пути. Вертикальные зеленые отрезки на спектрограмме – это следы служебной информации спутника. На нижнем фрагменте показан полный спектр временной реализации длительностью 2608 мс, где вертикальные линии на оси абсцисс совпадают с частотами на оси ординат верхнего фрагмента. Максимум в спектре приходится на частоту ~2500 Гц, характерную для спектров обычных атмосферериков вблизи грозовых разрядов

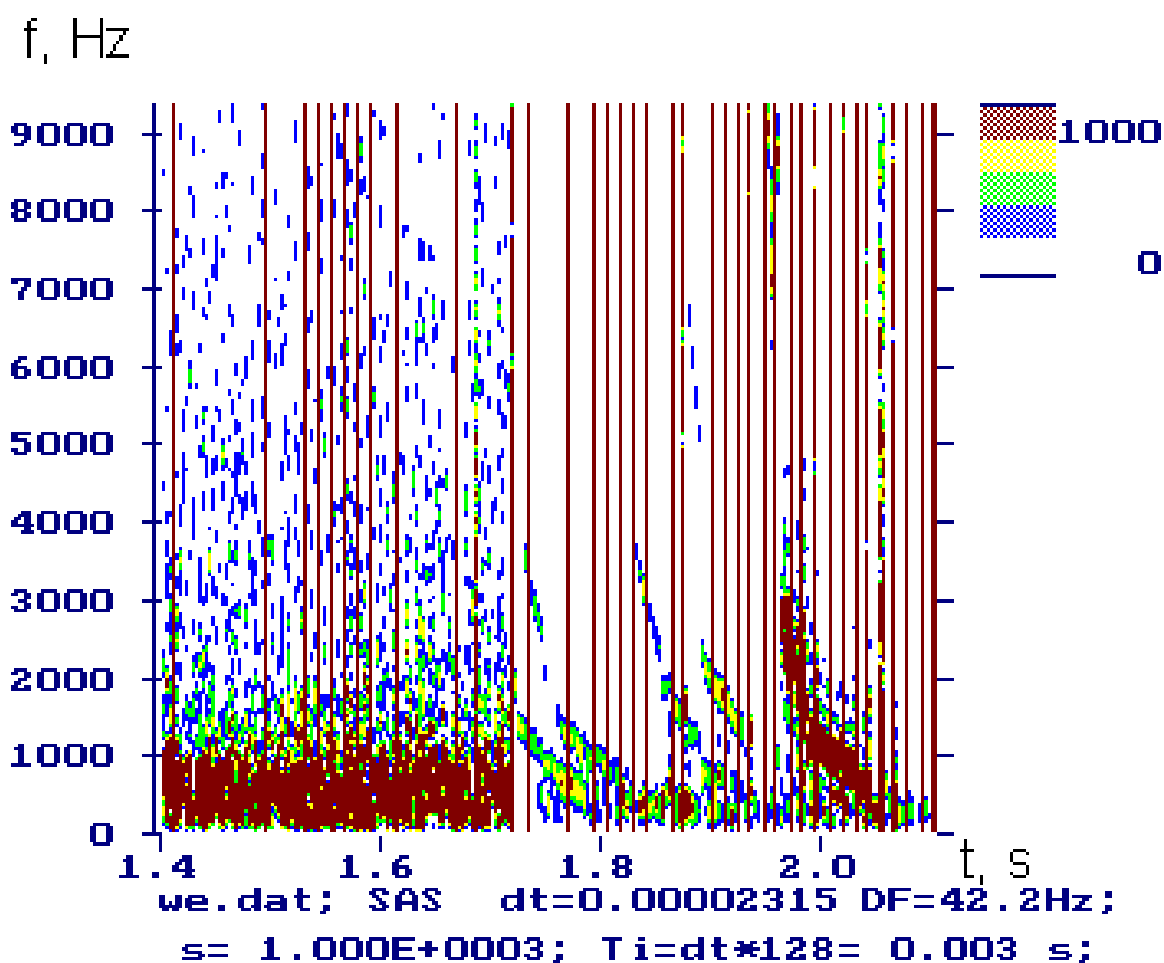


Рис. 15. Пример измерения электрической компоненты излучения прибором НВК в диапазоне очень низких (VLF) и сверхнизких частот (ELF), виток 00655, 29.11.06, 09:55:36 UT

На спектрограмме рис. 16 видны следы дискретных сигналов с частотой, уменьшающейся со временем. Шкала интенсивности следов показана слева. На верхнем фрагменте представлена спектрограмма электрической компоненты, на нижнем — магнитной. Длительность сигналов ~200–400 мс. Это так называемые частично-диспергированные

(ч.д.) свистящие атмосферерики (СА), генерируемые молниевыми разрядами в волноводе Земля – нижняя ионосфера и распространяющиеся до высоты спутника по короткому пути. Максимум в спектре приходится на частоту ~2500 Гц, характерную для спектров обычных атмосферериков вблизи грозных разрядов. Оценена дисперсия сигналов — $D \sim 5$. Данные наземных наблюдений по системе TOGA показывают наличие большого числа сильных молниевых разрядов в районе, над которым в это время пролетал спутник, и велась регистрация прибором ОНЧ/КНЧ-ОНЧ. Детальный анализ наблюдавшихся ОНЧ-явлений проводится на основании точных моделей распространения свистовых волн.

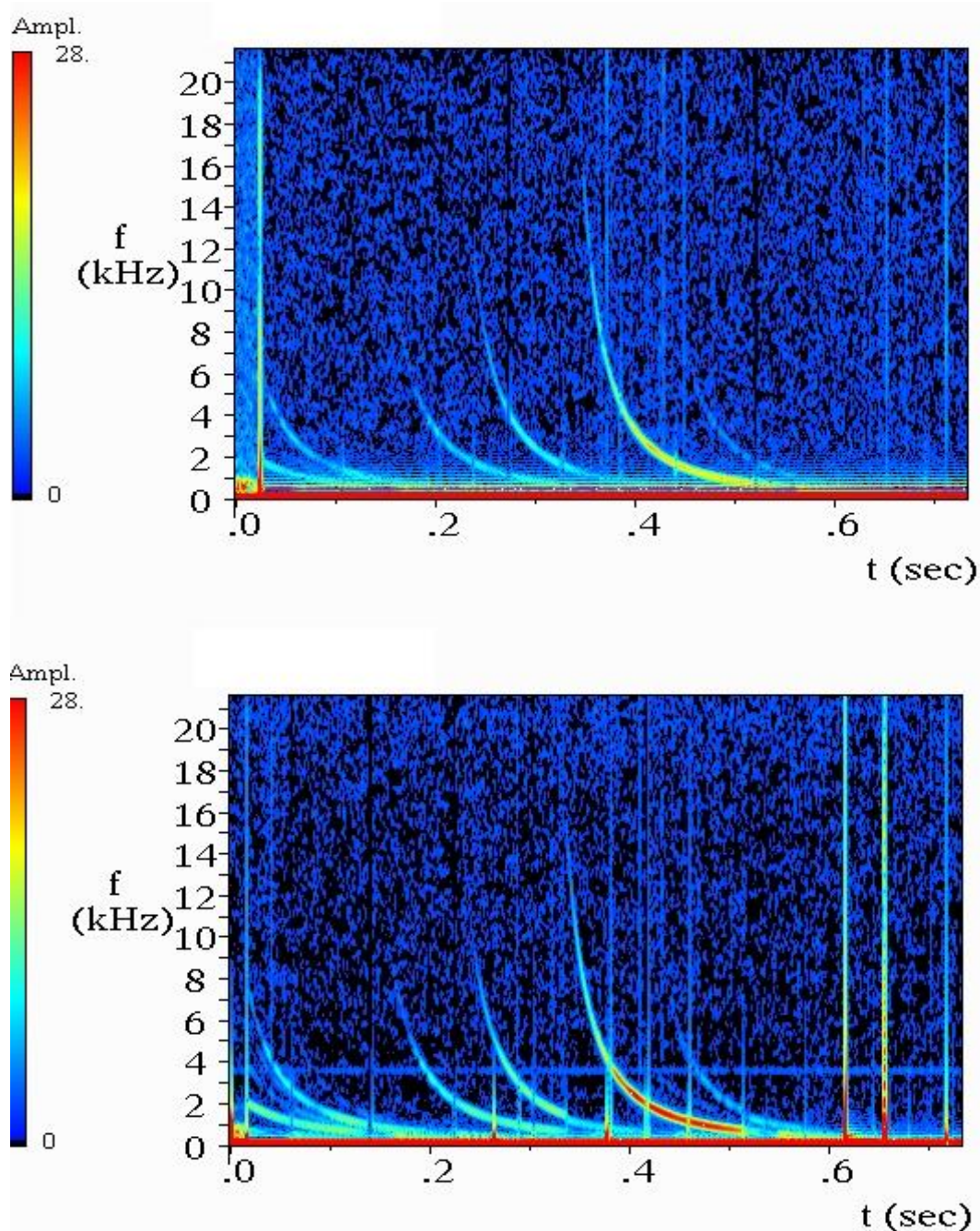


Рис. 16. Регистрация прибором ОНЧ/КНЧ свистящих атмосферериков в ионосфере 29.11.2006, 05:00:00 UT

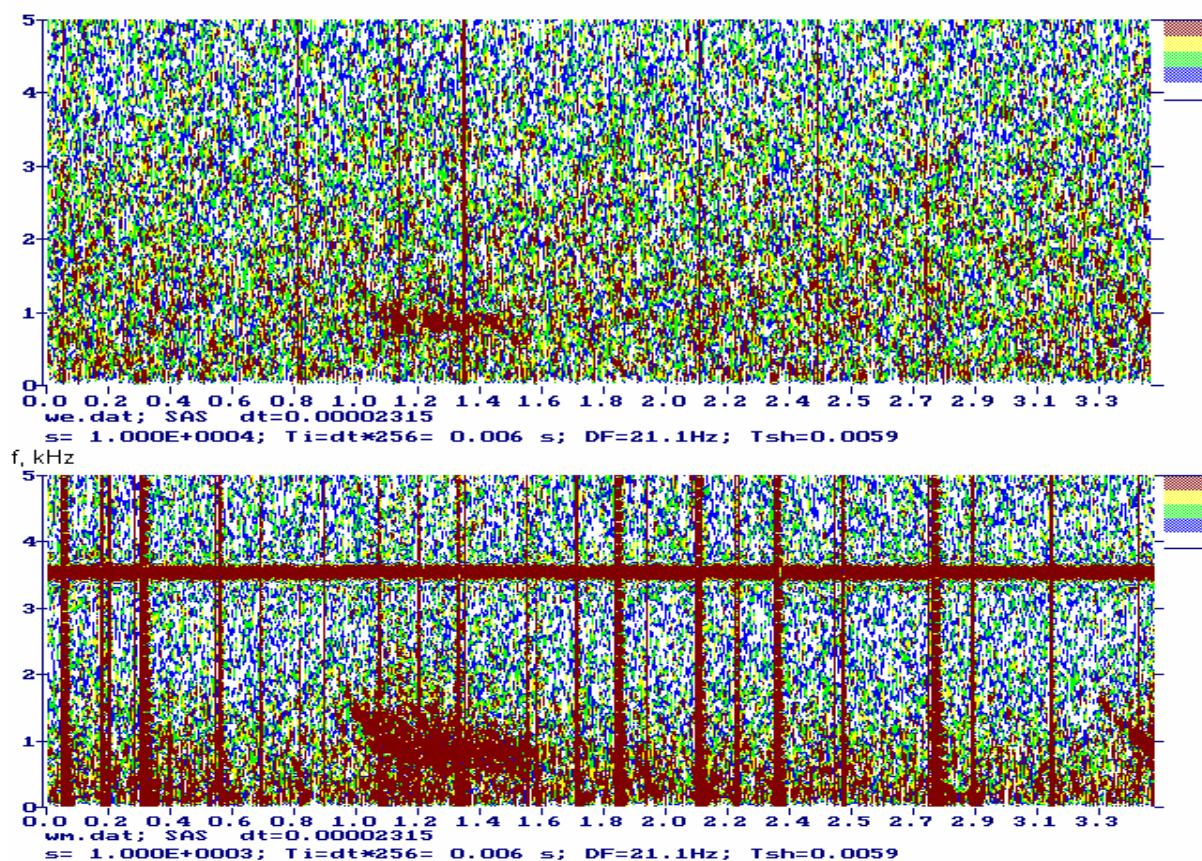


Рис. 17. Регистрация прибором ОНЧ низкочастотных шумов, вероятно связанных с высыпаниями частиц, 11.02.2007 г в ~10:02 UT над Центральной Европой

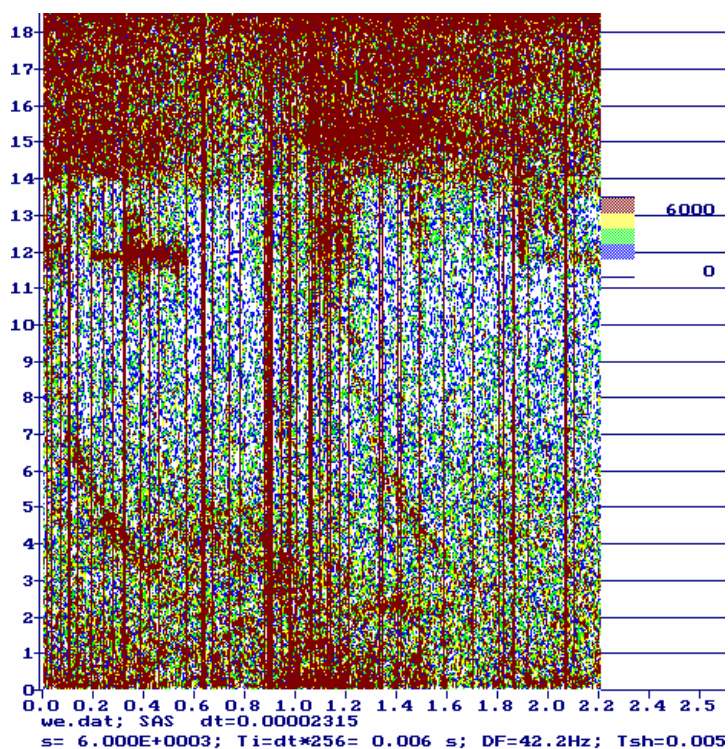


Рис. 18. Наблюдение уширения частотного диапазона сигнала наземных СДВ-передатчиков (запись 18.03.2007 г в 17:09:17 UT – электрическая компонента)

Во время пролета спутника над Центральной Европой (рис. 17) на сонограмме записи наблюдался необычный сигнал с высоким уровнем в узком диапазоне частот — 500-2000 Гц, который напоминает низкочастотный ч.д. СА с последующим шумовым излучением на частоте максимума в спектре ч.д. или же это серия почти не разделяемых ч.д. Система TOGA в это время локализовала несколько атмосфериков в Средиземноморье.

При взаимодействии монохроматических волн с магнитосферной плазмой возникают триггерные излучения или уширение частотного спектра этих сигналов (рис. 18). Триггерные излучения, по-видимому, связаны с резонансным взаимодействием ОНЧ-волн с электронами радиационных поясов в неоднородном магнитном поле. Эффекты уширения частотного спектра могут быть обусловлены магнитосферным взаимодействием свистовых волн.

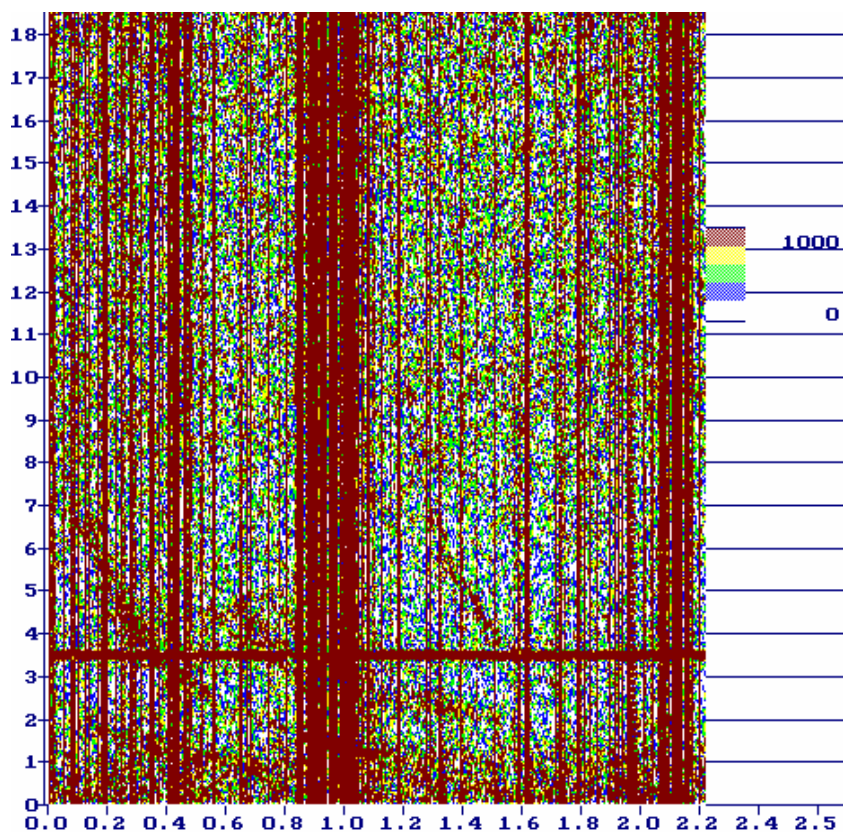


Рис. 19. Регистрация свистящих атмосфериков 18 марта 2007 г. сеанс 859 17:09:17 UT. Следы СА, зарегистрированных над Камчаткой на борту спутника прибором НВК (магнитная компонента, сеанс 859)

Регистрация ординарных свистящих атмосфериков (СА) на спутнике «Компас-2» позволила апробировать систему регистрации и обработки ОНЧ-данных.

Ниже приведены характеристики СА, зарегистрированного 18.03.07 в 17:09:17 UT, включая параметры: носовая частота f_n , L -оболочка, по которой распространялся свист и D -дисперсия свиста. Вычисление этих параметров

проводилось по стандартной методике обработки СА. Характеристики СА соответствуют данным для района наблюдений (Камчатка).

$$1 \text{ с} — 6,57 \text{ см}$$

$$f_1 = 6 \text{ кГц}; \Delta t_1 = 0,7 \text{ см} = 0,1065449 \text{ с}$$

$$f_2 = 4,5 \text{ кГц}; \Delta t_2 = 2 \text{ см} = 0,304414 \text{ с}$$

$$f_3 = 3 \text{ кГц}; F(x) = \Delta t_1 / \Delta t_2 = 0,35; x = 0,163$$

$$x = f_1 / f_{H1}; f_{H1} = 6 / 0,163 = 36,8098 \text{ кГц.}$$

$$f_n = 0,387 \cdot 36,8098 = 14,245398 \text{ кГц.}$$

$$L = (880 / 36,8098)^{1/3} = (23,906677)^{1/3} = 2,88.$$

$$D_1 = \Delta t_1 f_1^{1/2} / \Phi(\beta x); D_2 = \Delta t_2 f_1^{1/2} / \Phi(\alpha^x).$$

$$D_1 = 0,1065449 \cdot 77,459666 / 0,116 = 71,146.$$

$$D_2 = 0,304414 \cdot 77,459666 / 0,33 = 71,454.$$

На рис. 20 приведен динамический спектр низкочастотного волнового ОНЧ/КНЧ излучения, полученный при пролете над Камчаткой 27.02.2007 в 21:35:49. Обнаруженные аномальные сигналы, возможно связанные с подготовкой землетрясения, которое произошло в районе Камчатки 28.02.2007 и имело магнитуду 4.2 (рис. 21). В первой половине кадра хорошо виден частично диспергированный СА с максимумом в спектре ~5 кГц, что указывает на то, что это может быть результат прохождения на спутник атмосферика, пришедшего с расстояния ~1000–1500 км. На рис.20 также наблюдается серия следов СА, параметры которых не удалось оценить стандартным методом из-за сложности структуры сигнала. Однако, можно оценить район в противоположном полушарии, откуда на спутник по силовым линиям геомагнитного поля могли пройти сигналы. Системой TOGA локализована группа сигналов на юго-востоке Австралийского континента.

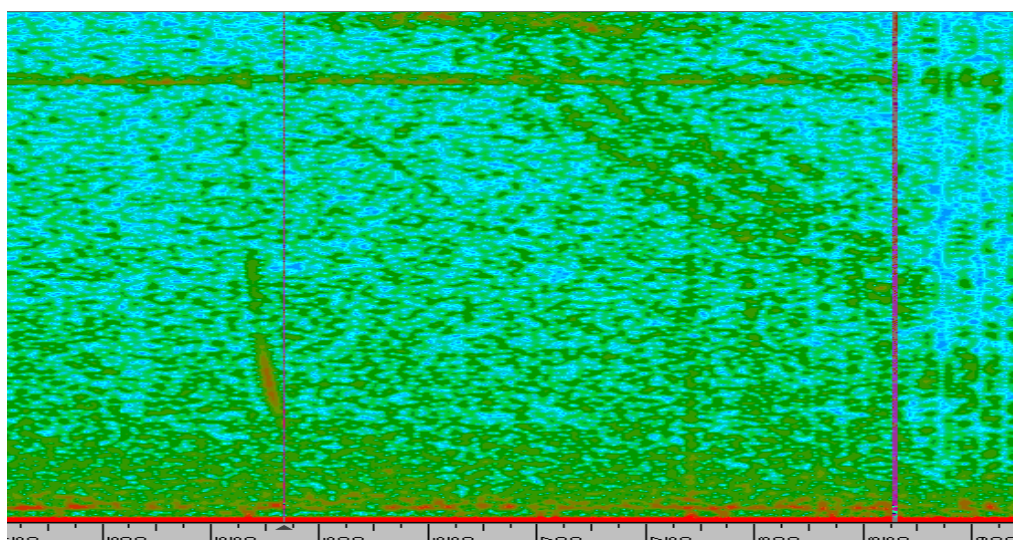


Рис. 20. Свистящие атмосферники зарегистрированные над Камчаткой 27.02.2007 в 21:35:49 за сутки до землетрясения

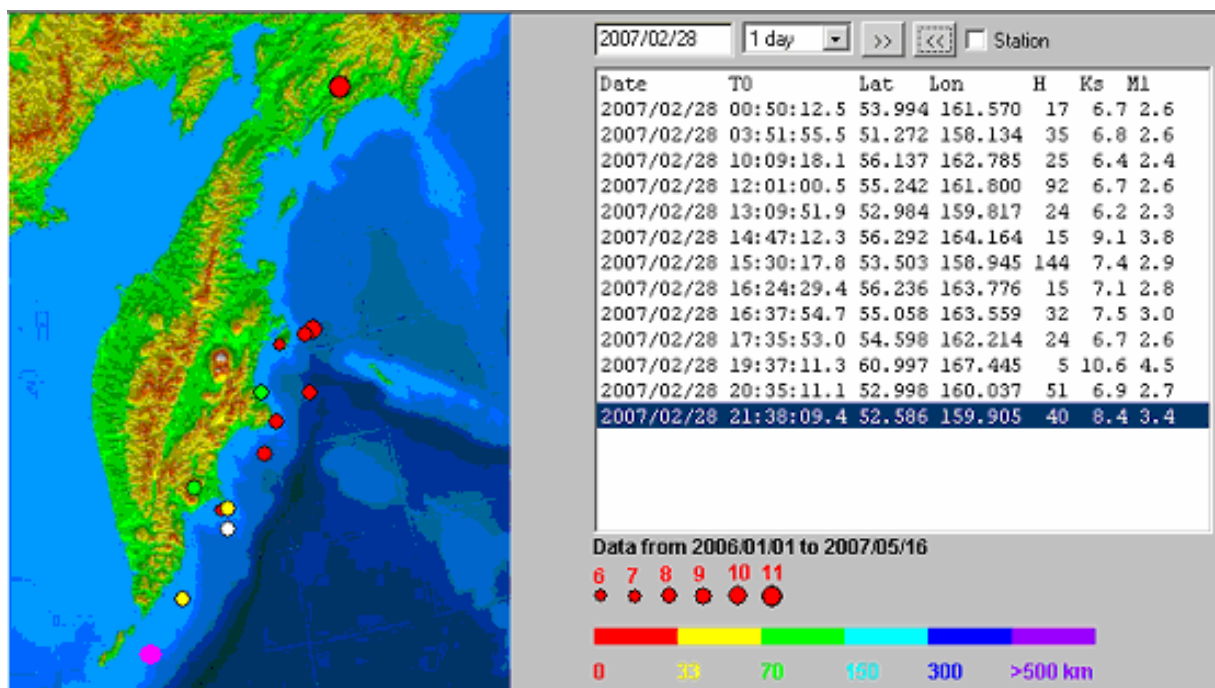


Рис. 21. Распределение землетрясений на Камчатке 28.02.2007

Красный кружок в верхнем правом углу карты рис. 21 соответствует землетрясению класса $K=11$, а розовый кружок внизу — положение спутника во время регистрации ОНЧ-сигналов 27.02.2007 в 21:35:49 (сеанс 790).

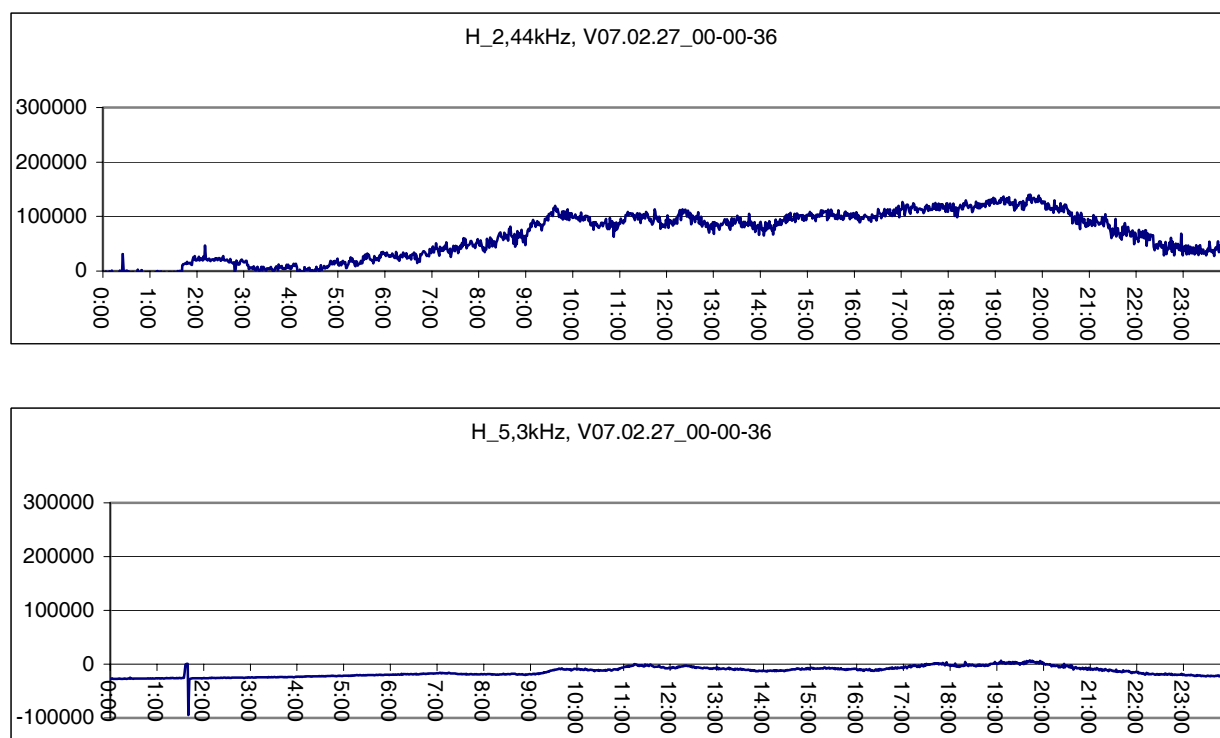


Рис. 22. Наземные данные приема ОНЧ-излучений 27.02.2007 в Паратунке на Камчатке. Вверху — суточное распределение углов прихода ОНЧ-сигналов (атмосфериков). Внизу — суточный ход амплитуды огибающей на выходе. Время указано в UT

Наземные данные в Паратунке на Камчатке показали, что в период пролета спутника над Камчаткой 27.02.07 в 21:35:49 наблюдалось достаточно мощное излучение с юго-западного направления и малое количество атмосфериков, пришедших с других направлений. В аналоговой записи, в период пролета спутника над Камчаткой в 21:35:49 27.02.07 было понижение уровня сигнала на всех регистрируемых частотах, максимальное значение излучения наблюдалось в 19–20 ч. Плоскость рамочной антенны располагалась в направлении восток-запад.

Заключение

Опытная эксплуатация комплекса научной аппаратуры спутника «Компас-2» показала, что он может быть использован в качестве основы для создания научных комплексов ионосферного мониторинга в последующих проектах и системах, предназначенных для обнаружения и регистрации аномальных явлений в околоземном космическом пространстве, связанных с землетрясениями и другими природными и техногенными катастрофами.

Управление спутником «Компас-2» осуществляли ЦУП ЦНИИМАШ (Satellite mission control center, г. Королев), ГРЦ им. акад. В.П. Макеева (National Rocket Center at Miass) и ИЗМИРАН (г. Троицк).

2.1.3. ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ ИМ. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН

2.1.3.1. Исследование корональных выбросов массы методом радиозондирования

1. На основе экспериментальных данных, полученных в научных центрах Германии и США, разработан метод двухпозиционного радиозондирования, позволяющий изучать свойства, динамику и эволюцию корональных выбросов массы (СМЕ) на различных расстояниях от Солнца. В настоящее время для определения характеристик СМЕ используются контактные и дистанционные методы. На малых гелиоцентрических расстояниях (менее $25 R_S$) используются наблюдения потока рентгеновского излучения на спутнике GOES-10, данные коронографа SOHO/LASCO и коронального радиозондирования. На гелиоцентрических расстояниях $(30-180)R_S$ единственным источником информации о плазме солнечного ветра является метод радиозондирования. На больших дистанциях мониторинг солнечного ветра осуществляется контактными методами при помощи космических аппаратов (КА) в межпланетном пространстве вблизи Земли и других планет. Первый опыт многопозиционного радиозондирования был осуществлен на основе данных, полученных с 12 по 24 мая 2000 г. при помощи КА GALILEO и CASSINI. Корональный выброс массы был обнаружен 13 мая 2000 г. в 22:22 UT; он двигался с очень высокой скоростью (более 1080 км/с) на дистанциях $(2,3-16,6)R_S$. Этот факт подтверждается высокой скоростью СМЕ, найденной по времени регистрации максимума потока рентгеновского излучения на расстоянии $1R_S$ и максимума уширения спектральной линии сигнала CASSINI на расстоянии $2,3R_S$. Нижняя граница скорости СМЕ на расстояниях $(1-2,3)R_S$ составила 340 км/с. Средняя скорость между $16,6R_S$ и орбитой Земли — 740 км/с; скорость плазмы на орбите Земли — 450 км/с. Эти данные свидетельствуют о сильном торможении СМЕ на расстояниях более $16,6R_S$.

Рисунок 1 характеризует последовательность событий, зарегистрированных после генерации коронального выброса массы 13 мая 2000 г. около 22:22 UT. В этот момент времени на борту КА GOES-10 наблюдался максимум потока излучения S_x в рентгеновском диапазоне (рис. 1а). С запаздыванием $\Delta T_1 = 0,92$ ч на трассе радиозондирования с КА CASSINI, удаленной от центра Солнца на расстояние $2,3R_S$, были зарегистрированы 2 максимума ширины спектральной линии (В) сантиметровых сигналов (рис. 1б). Спустя 2,35 ч после регистрации максимума В (или 3,27 ч после максимума S_x) наблюдался максимум дисперсии флуктуаций частоты дециметровых радиоволн КА GALILEO, которые зондировали потоки плазмы на гелиоцентрических расстояниях около $16,6R_S$, (рис. 1в). Наконец, на рис. 1г представлены результаты измерений концентрации заряженных частиц N , выполненных плазменными приборами на борту четвертого космического аппарата — спутника Земли

WIND. По горизонтальной оси каждого рисунка указаны истинные времена каждого события (в сутках 2000 г.).

Данные GOES-10:

http://www.swpc.noaa.gov/ftplib/warehouse/2000/2000_plots

Данные WIND: http://ftpbrowser.gsfc.nasa.gov/wind_swe_2m.html

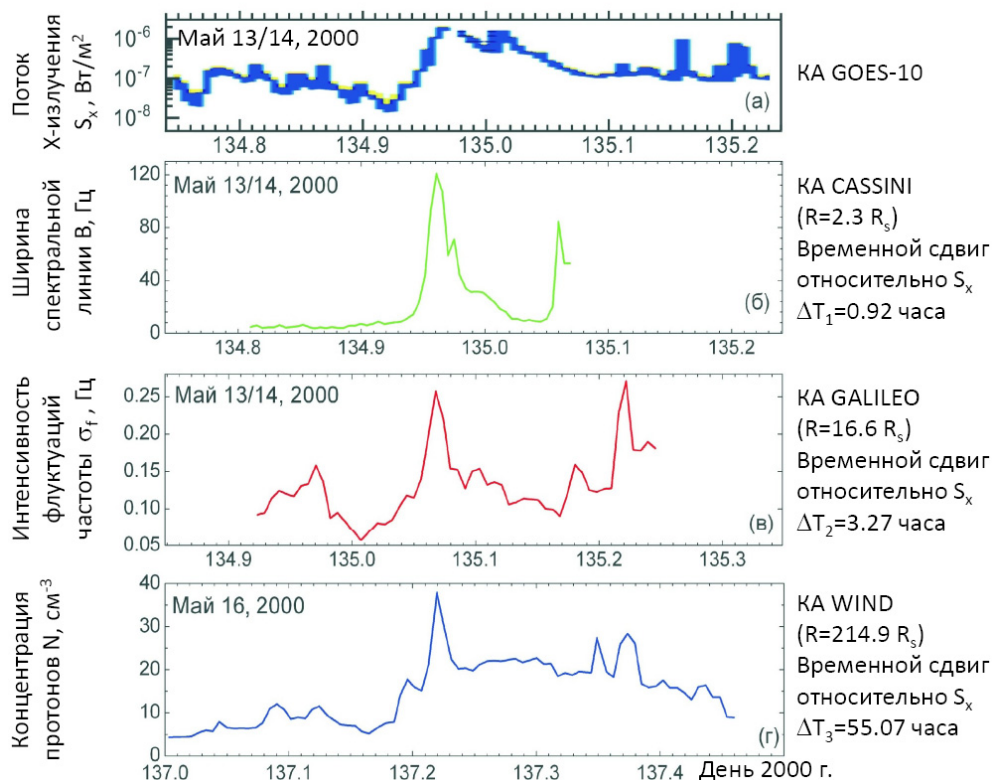


Рис. 1. Изменения потока рентгеновского излучения Солнца S_x (а), ширины спектральной линии В КА CASSINI (б), интенсивности флуктуаций частоты сигналов σ_f КА GALILEO (в) и концентрации заряженных частиц N вблизи орбиты Земли по данным КА WIND (г).

Из представленных на рис. 1 данных следует, что временные изменения ширины спектральной линии В сигналов КА CASSINI, интенсивности частотных флуктуаций сигналов КА GALILEO и концентрации плазмы КА WIND происходят одинаковым образом: имеется большой максимум в ведущей части возмущения, затем спустя 2,3–2,6 ч регистрируется второй меньший по уровню максимум. Наконец, при сдвиге около 3,6 ч относительно главного максимума у флуктуаций частоты σ_f и концентрации плазмы N проявляется третий максимум (измерения ширины спектральной линии В в этот промежуток не проводились). Подобие временных зависимостей, представленных на рис. 1, свидетельствует о качественном сохранении радиальной структуры CME возмущения в широкой области гелиоцентрических расстояний при движении возмущения от Солнца. Временной сдвиг между событиями позволяет определить скорость движения возмущенного плазменного образования, классифицированного как корональный выброс массы, в различных диапазонах гелиоцентрических расстояний.

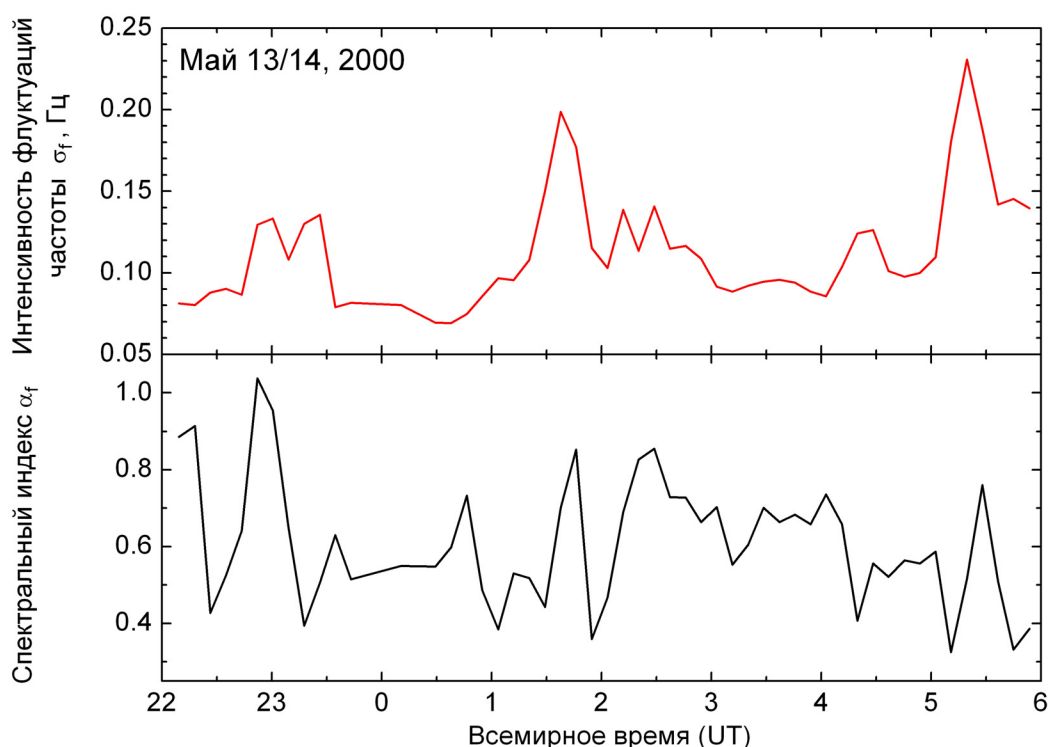


Рис. 2. Интенсивность флуктуаций частоты (верхняя панель) и спектральный индекс спектров частотных флуктуаций (нижняя панель) сигналов КА GALILEO для 13 и 14 мая 2000 г.

Запаздывание $\Delta T_1 = 0,92$ ч максимума ширины спектральной линии по сравнению с максимумом потока рентгеновского излучения S_X дает среднюю скорость перемещения CME $V_1 = 340$ км/с для гелиоцентрических расстояний $(1-2,3)R_S$. Сопоставление флуктуационных эффектов на линии связи КА CASSINI – Земля с аналогичными эффектами на трассе радиозондирования КА GALILEO – Земля свидетельствует о высокой скорости перемещения CME для гелиоцентрических расстояний между 2,3 и 16,6 радиусов Солнца $V_2 = 1180$ км/с. Спектральный анализ флуктуаций частоты дециметровых радиоволн КА GALILEO позволил выявить еще одну особенность потоков плазмы, относящихся к корональным выбросам массы. На рис. 2 представлены временные зависимости интенсивности частотных флуктуаций σ_f и спектрального индекса α_f временных спектров этих флуктуаций. Видно, что повышенные значения флуктуаций частоты σ_f сопровождаются повышенными значениями спектрального индекса α_f .

2. Проведен анализ результатов измерений флуктуаций частоты радиосигнала космического аппарата GALILEO в интервале времени с 6 по 11 января 1997 г. В этот период было зарегистрировано прохождение через трассу радиосвязи космический аппарат – наземный пункт коронального выброса массы, наблюдавшегося коронографом LASCO обсерватории SOHO 6 января 1997 г. Анализ этого явления представляет особый интерес, поскольку он стал первым событием такого рода, за которым удалось проследить в реальном масштабе времени, начиная от момента его генерации

на Солнце до его воздействия на магнитосферу и ионосферу Земли. Возмущение сопровождалось глобальным сжатием земной магнитосферы, сильным возрастанием плотности в магнитосферном плазменном слое, его приближением к поверхности Земли, значительным повышением плотности плазмы, максимальное значение которой достигло беспрецедентной для орбиты Земли величины 185 см^{-3} . Прохождение СМЕ через трассу *Земля – КА GALILEO*, располагавшуюся на гелиоцентрическом расстоянии около $32R_s$, сопровождалось рядом специфических радиоэффектов:

- увеличением в 2–3 раза интенсивности флуктуаций частоты, которое длилось 3 ч;
- увеличенным значением средней частоты сигнала;
- увеличенным значением показателя степени временного энергетического спектра флуктуаций частоты непосредственно за ведущим фронтом выброса;
- уменьшенным значением показателя после прохождения ведущей части возмущения;
- двумя максимумами в кросс-корреляционной функции флуктуаций частоты.

Максимальное значение концентрации в передней части плазменного образования более чем на порядок превышает фоновую величину. Наличие двух максимумов в кросс-корреляционной функции обусловлено одновременным присутствием на луче зрения спокойного и возмущенного потоков с пространственно разнесенными максимумами концентрации и уровня турбулентности. Наблюдение плазменных возмущений методом радиозондирования на восточной (по отношению к Солнцу) области опережает регистрацию аналогичных возмущений в околоземном космическом пространстве на 2–2,5 сут. Выявлена четкая корреляция между изменением средней частоты зондирующего сигнала и концентрацией плазмы в околоземном пространстве. Обнаружена тенденция к росту спектрального индекса частотных флуктуаций при увеличении их интенсивности, связанной с появлением на трассе распространения радиоволн возмущенных потоков плазмы. Показано, что сравнение данных радиозондирования с оптическими наблюдениями вблизи Солнца и плазменными измерениями на спутнике Земли WIND позволяет находить скорость перемещения СМЕ в различных областях свёрхкороны Солнца.

2.1.3.2. Радиофизические методы спутникового зондирования слоистых, волновых и турбулентных структур в атмосферах Земли и Венеры

1. Метод определения поглощения радиоволн на транс-ионосферных линиях связи спутник–спутник и измерения положения слоистых плазменных структур в нижней ионосфере

На основе анализа радиоголограмм, зарегистрированных спутниками CHAMP, FORMOSAT-3 и другими при прохождении высокоточных

радиосигналов спутниковой навигационной системы GPS через ионосферу и атмосферу Земли, обнаружена, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена связь между временными вариациями интенсивности, фазы, частоты и производной частоты по времени (ускорения фазы) радиоволн. На основе этой связи предложен метод измерения поглощения радиоволн на радиозатменных трассах спутник-спутник (рис. 1). Изучено атмосферное поглощение сантиметровых волн на затменных трассах спутник-спутник и показана возможность мониторинга распределения паров воды и параметров облачных структур в тропосфере. Разработана методика определения положения точки поворота T на лучевой траектории радиоволн, что позволяет определять положение, высоту и наклон слоистых неоднородностей в ионосфере и атмосфере. Метод был применен для анализа экспериментальных данных радиозатменной (РЗ) миссии CHAMP (рис. 2–4). Для рассмотренных РЗ сеансов определено положение наклонных плазменных слоев и найдено распределение электронной плотности.

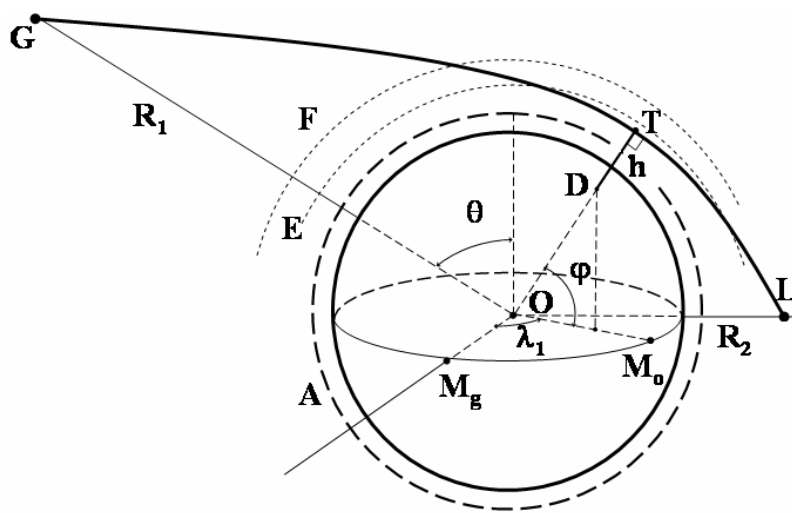


Рис. 1. Схема радиозатменного эксперимента: O — центр Земли; L — приемный спутник, G — навигационный спутник; h — высота точки поворота лучевой траектории радиоволн; DT — высотный интервал измерений вертикальных профилей физических параметров атмосферы (A) и ионосферы (E, F)

Новая методика, основанная на совместном анализе вариаций ускорения фазы и рефракционного ослабления, является перспективной для локализации слоистых структур в околоземном пространстве. Ее эффективность проиллюстрирована с помощью анализа экспериментальных данных, зарегистрированных на спутнике CHAMP. В дальнейшем желательно провести сравнение разрабатываемого метода с результатами наблюдений наземных ионозондов. Представленный метод и другие новые методики позволяют получить нарастающий объем информации о плазменных структурах и естественных процессах в ионосфере и их связи с процессами в магнитосфере и межпланетном пространстве путем анализа данных существовавших в прошлом и действующих в настоящее время спутниковых миссий GPS/MET, CHAMP, SAC-C, GRACE и FORMOSAT-3.

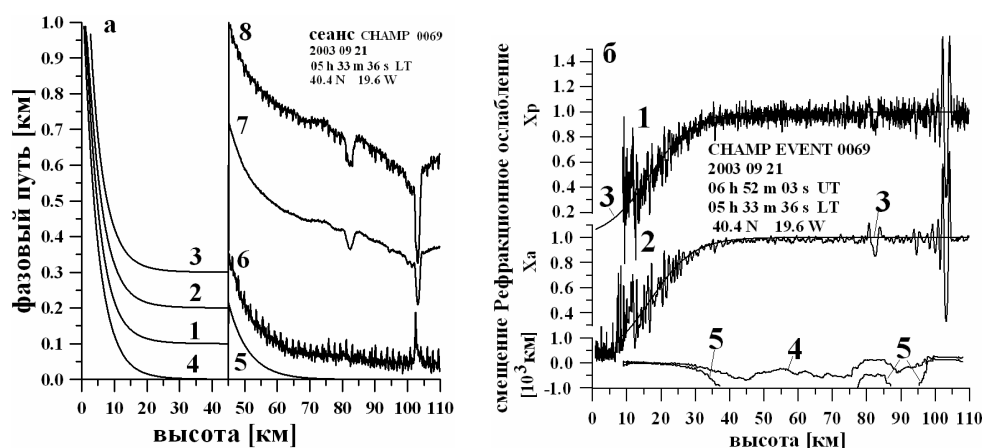


Рис. 2. *а* — изменения фазового пути на частотах $F1$ и $F2$ (кривые 1 и 2), связанные с влиянием ионосферы и атмосферы в зависимости от высоты перигея лучевой траектории спутник-спутник. Для сравнения кривые 1 и 2 смещены на 100 и 200 м соответственно.

Кривая 3 получена из фазовых путей на частотах $F1$ и $F2$ с помощью ионосферной коррекции. Кривая 3 показывает часть фазового пути, соответствующего нейтральной атмосфере, и смещена на 300 м для сравнения с кривой 4, рассчитанной для стандартной модели атмосферы. Кривые 1–4 показывают изменения фазового пути на высотах ниже 45 км. На высотах, больших 45 км, вариации фазового пути, увеличенные в 1000 раз, иллюстрируются кривыми 5–8. Кривые 5 и 6 описывают, соответственно, вклад стандартной нейтральной атмосферы, рассчитанный с помощью модели атмосферы и путем ионосферной коррекции экспериментальных данных соответственно. Кривые 7 и 8 соответствуют экспериментальным зависимостям фазового пути от высоты на частотах $F1$ и $F2$. Для сравнения кривые 6, 7 и 8 смещены относительно кривой 5 на 5, 30 и 50 см соответственно; *б* — сравнение вариаций ускорения фазы, пересчитанных в рефракционное ослабление X_p (кривая 1), и рефракционного ослабления, определенного из интенсивности P3 сигнала X_a (кривая 2), на первой частоте $F1$ навигационной системы GPS

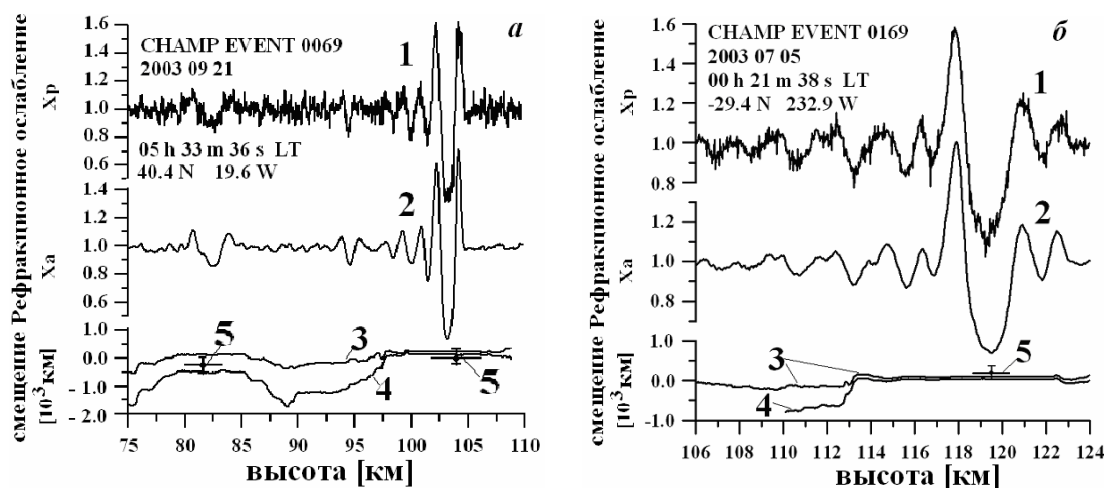


Рис 3. Сравнение вариаций ускорения фазы *а*, пересчитанных в рефракционное ослабление X_p , и рефракционного ослабления X_a , найденного по амплитудным данным на первой частоте $F1$ навигационной системы GPS (кривые 1 и 2), и результаты определения смещения d точки поворота T от перигея P3 луча (кривые 3 и 4). Данные относятся к сеансам CHAMP № 0069, сентябрь 21, 2003, $40,4^\circ$ N, $19,6^\circ$ W (панель *а*) и № 0169, июль 05, 2003, $29,4^\circ$ S, $232,9^\circ$ W (панель *б*). Вертикальные и горизонтальные отрезки 5 соответствуют ошибкам измерения

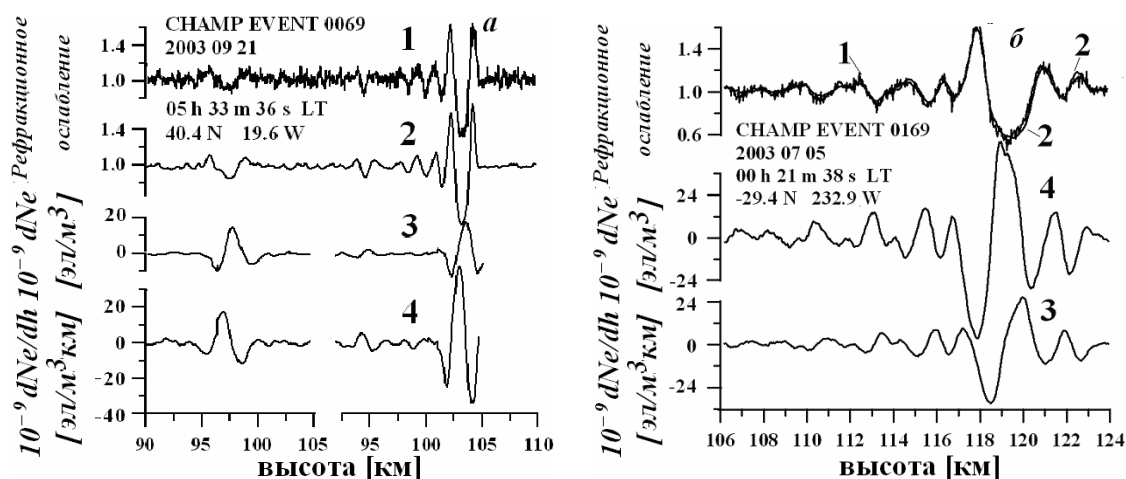


Рис. 4. Сравнение вариаций ускорения фазы a , пересчитанных в рефракционное ослабление X_p , и рефракционного ослабления X_o , найденного по амплитудным данным на первой частоте F1 навигационной системы GPS (кривые 1 и 2), и восстановленные вариации электронной плотности и ее вертикальных градиентов как функции скорректированной высоты в ионосфере. Данные соответствуют сеансам CHAMP № 0069 и 0169

2. Наблюдение пространственного распределения интенсивных спорадических слоев E_s в период спада солнечной активности в 2001–2006 гг. с помощью спутников CHAMP и FORMOSAT-3

Получены карты распределения интенсивных спорадических слоев E_s в период спада солнечной активности. Географическое распределение интенсивных спорадических слоев (с индексом амплитудных вариаций S_4 большим 0,12) по данным измерений на спутнике CHAMP на частоте 1575,42 МГц показаны на рис. 6 и 7. Необходимо отметить, что неравномерность в указанных распределениях может быть связана с неодинаковой посещаемостью спутника CHAMP. Анализ посещаемости показал, что за рассматриваемые периоды времени измерения были распределены по земному шару практически равномерно. Таким образом, эти распределения содержат важную информацию о пространственном распределении интенсивных спорадических слоев в рассмотренные интервалы времени. Анализ указанных распределений показывает, что они концентрируются в определенных зонах (например, в экваториальной зоне, а также вблизи северного и южного геомагнитного полюса Земли (рис. 5, 6). Высокая активность наблюдается после захода Солнца вечером от 20 до 24 ч местного времени. Это согласуется с данными наземных измерений. Можно отметить, что географические распределения ночных и дневных случаев сильно отличаются. Дневные события преобладают в Северной и Южной полярных зонах. Ночные события концентрируются в экваториальных областях и, частично, в средних широтах. Наиболее сильные различия в географических распределениях ночных (светлые кружки) и дневных (темные кружки) событий наблюдаются в апреле 2004 г. (рис. 6, правая нижняя панель).

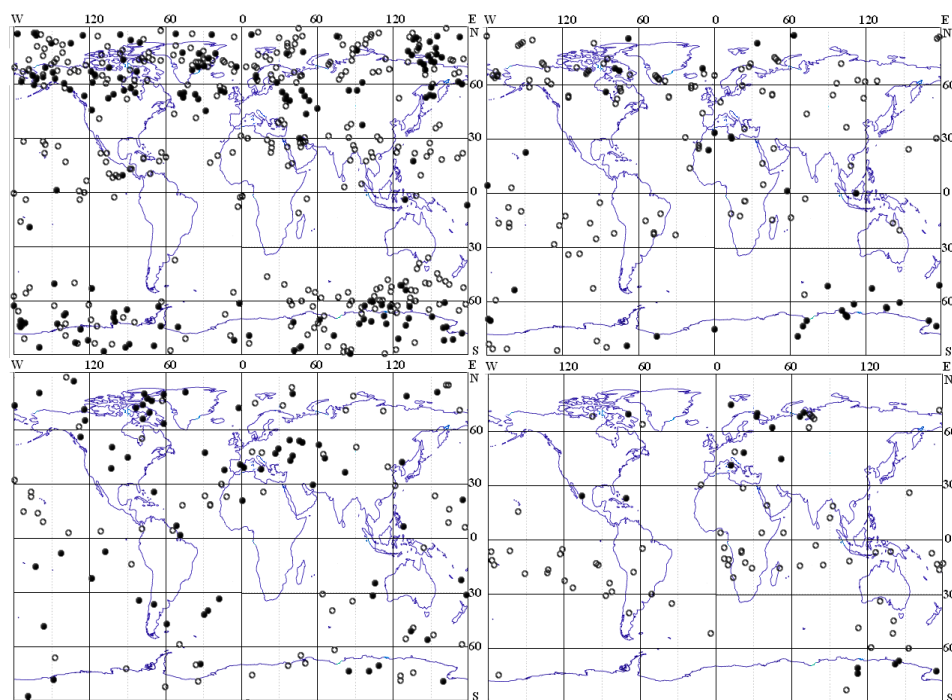


Рис. 5. Карты распределения интенсивных ионосферных слоев с индексом S_4 , большим 0,12, в октябре 2001 г. (левая верхняя панель), октябре 2002 г. (правая верхняя панель), октябре 2003 г. (левая нижняя панель) и в апреле 2004 г. (правая нижняя панель). Круги показывают географическое положение точки поворота T (рис. 1). Дневные события обозначены темными кружками (местное время 08–20 ч), ночные события отмечены светлыми кружками (местное время 20–08 ч)

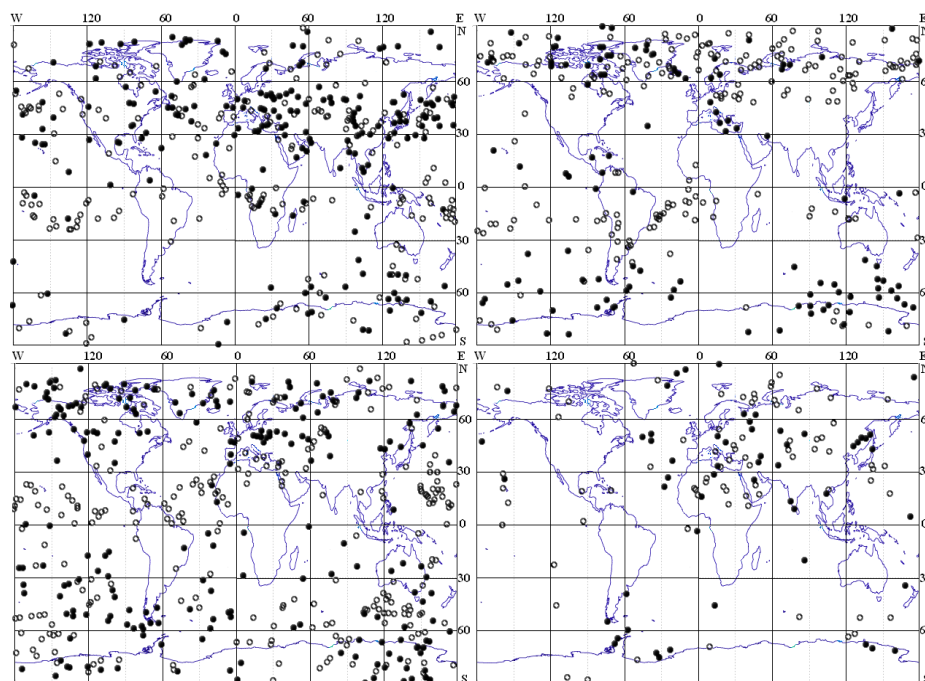


Рис. 6. Карты распределения интенсивных ионосферных слоев с индексом S_4 , большим 0,2, в период 14 мая – 14 июля 2001 г. (левая верхняя панель), ноябрь–декабрь 2001 г. (правая верхняя панель), 28 октября – 26 ноября 2003 г. (левая нижняя панель), июль 2004 г. (правая нижняя панель). Дневные события обозначены темными кружками (местное время 08–20 ч), ночные события отмечены светлыми кружками (местное время 20–08 ч)

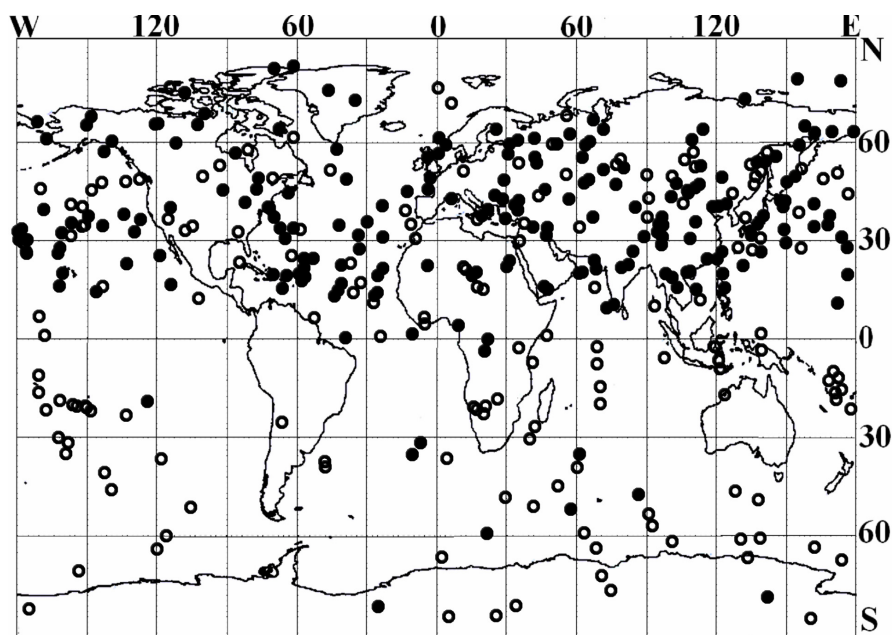


Рис. 7. Глобальное распределение интенсивных спорадических слоев Es по данным спутников FORMOSAT-3 с индексом S_4 , большим 0,12, в период 01, 11 и 12 июня 2006 г. Сплошные кружки соответствуют дневным событиям, открытые кружки — ночным событиям

Сезонная зависимость географического распределения интенсивных ионосферных событий, зарегистрированных спутником CHAMP показана на рис. 6. Сезонное смещение интенсивных ионосферных событий в северном и южном направлениях заметно в период май–июль 2001 г. (рис. 6, левая верхняя панель), ноябрь–декабрь 2001 г. (рис. 6, правая верхняя панель) и сентябрь 2001 г. (рис. 5, левая верхняя панель). Число интенсивных ионосферных событий возрастает в северной полярной области в высоких широтах (больших 60°N) от мая–июля 2001 г. к ноябрю–декабрю 2001 г. Одновременно число интенсивных ионосферных событий уменьшается в средних широтах в интервале $30\text{--}60^\circ \text{N}$. Возможная причина сезонных изменений может быть связана с двумя важными механизмами образования интенсивных ионосферных слоев. Первый механизм связан с инжекцией энергичных электронов и связанной с этим ионизацией в полярных областях, второй механизм – ультрафиолетовое излучение Солнца. Влияние солнечной радиации имеет сезонный и суточный характер. Из проведенного анализа следует, что амплитудная часть спутниковых радиозатменных радиоголограмм является ценным источником информации о географических и сезонных распределениях ионосферных возмущений и их связи с солнечной активностью.

На рис. 7 показан пример глобального распределения интенсивных спорадических слоев E_s в период 01, 11 и 12 июня 2006 г. по данным спутников FORMOSAT-3. На рис. 7 заметна концентрация интенсивных спорадических слоев в средних широтах северного полушария Земли, где в июне высота Солнца над горизонтом и ионизация его ультрафиолетовым излучением максимальна. Данные, представленные на рис. 7, указывают на связь возникновения мощных спорадических слоев E_s в дневное время с

излучением Солнца. Пространственное распределение ночных спорадических слоев является практически равномерным, что указывает на механизм их образования, возможно, связанный с переносом плазмы и с процессам ионизации энергичными электронами.

Исследованы флуктуации амплитуды и фазы дециметровых радиоволн на затменных трассах спутник-спутник и изучены особенности мелкомасштабной неоднородности ионосферной плазмы в экваториальных и полярных районах. Изучены регулярные вариации амплитуды и фазы радиоволн, обусловленные спорадическими явлениями (E_s -структуры) в нижней ионосфере. Получены высотные профили электронной концентрации и статистические характеристики E_s -структур в разных районах. Показано, что после прихода ударной волны солнечного ветра в полярной ионосфере возбуждается интенсивная мелкомасштабная неоднородность ионосферной плазмы, а в нижней ионосфере регистрируется появление интенсивных спорадических E_s -структур.

3. Новый метод глобального мониторинга внутренних атмосферных волн

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) играют решающую роль в определении циркуляции и состояния атмосферы. ВГВ можно обнаружить на любых высотах в атмосфере Земли и они важны по следующим причинам: внутренние волны могут переносить энергию и импульс из одного атмосферного района к другому; они могут инициировать и модулировать конвекцию и последующие гидрологические процессы; ВГВ нарушают базовое состояние атмосферы, инжектируя энергию и импульс в невозмущенный поток; при обрушении волн происходит генерация опасной для авиации турбулентности и перемешивание химических примесей; ВГВ и обрушение волн могут быть ответственны за формирование спорадических E слоев в ионосфере.

Преимуществом радиозатменных спутниковых измерений с целью исследования ВГВ является глобальный географический и временной охват волновых процессов в атмосфере на различных высотах. Это позволяет идентифицировать сезонные и широтные вариации волновой активности. Ранее считалось, что с помощью радиозатменных измерений невозможно оценить такие волновые параметры как внутренняя частота или фазовые скорости, которые необходимы для количественного описания эффектов ВГВ, поскольку наблюдаемыми величинами являются температура и атмосферная плотность. Предложен новый метод, который может быть использован для экспериментального определения всех волновых параметров из измеряемого вертикального профиля температуры, не требующий какой-либо дополнительной информации, которая не содержалась бы в профиле.

Сформулирован критерий положительной идентификации ВГВ для анализируемых флуктуаций температуры. Разработана аналитическая методика нахождения внутренней частоты ВГВ и других волновых параметров, основанная на сравнении экспериментальной и теоретической

величины относительного амплитудного порога, который определяется как волновая амплитуда, необходимая для возникновения динамической неустойчивости в атмосфере. В том случае, когда анализируемые флуктуации положительно идентифицируются как волновые проявления, внутренняя частота монохроматической ВГВ может быть определена путем использования всего одного вертикального профиля температуры. Практическое применение метода продемонстрировано на примере анализа профилей температуры, полученных при помощи спутниковой системы FORMOSAT. Предложенный метод может быть применен для анализа вертикальных профилей температуры, измеренных другими способами (зондирование с помощью релеевских лидаров, ракет, радиозондов и т. п.).

4. Расслоение верхнего яруса облаков Венеры по радиозатменным данным

Разработан принципиально новый метод анализа радиозатменных измерений, который дает возможность идентифицировать и разделять флуктуационные радиоэффекты, связанные с влиянием тонких регулярных слоев в атмосфере и неоднородностей случайного происхождения (турбулентность). Метод был использован при анализе флуктуаций амплитуды дециметровых сигналов (длина волны 32 см), зарегистрированных в экспериментах радиозондирования северной полярной атмосферы Венеры во время спутниковых миссий ВЕНЕРА-15, -16 (октябрь 1983 г.). В результате были получены следующие данные о параметрах (и их временной эволюции) мелкомасштабных структур в атмосфере верхнего яруса облаков планеты:

- Расслоение верхнего яруса облаков обнаружено в северной полярной атмосфере Венеры в период с 23 по 25 октября 1983 г. Об этом свидетельствует физически значимая корреляция амплитудных флуктуаций (коэффициенты корреляции $\sim 0,5-0,7$), установленная для трех зондируемых районов в интервале высот 59,0–61,5 км. Найдено, что вертикальная толщина тонких регулярных слоев составляет от 0,5 до 0,9 км, их горизонтальная протяженность в меридиональном направлении превосходит 180 км, а время жизни мелкомасштабных слоистых неоднородностей составляет более двух суток.
- Разделение полных вариаций и спектров мощности амплитудных флуктуаций на регулярную и случайную составляющие позволило проследить временную эволюцию мелкомасштабных структур в атмосфере Венеры. Случайные вариации составляли 14, 45 и 58 % от полных вариаций 23, 24 и 25 октября соответственно, что указывает на значительную временную изменчивость нерегулярного атмосферного окружения. Значения регулярных вариаций оказались практически одинаковыми для трех радиозондирований, что свидетельствует об отсутствии как роста, так и разрушения регулярных слоев в период с 23 по 25 октября 1983 г.

2.1.3.3. Определение электронной концентрации ионосферы на основе метода радиопросвечивания

Развит метод радиопросвечивания ионосферы Земли, основанный на использовании глобальных навигационных систем и алгоритмов решения обратных задач. Показано, что метод радиопросвечивания может быть использован для построения современной системы мониторинга ионосферы, предназначенной для решения задачи прогнозирования условий распространения радиоволн и последующего применения этих данных для оценки условий работы радиотехнических устройств в системах связи и спутниковых системах радиолокации, космической навигации и геодезии.

Практическая реализация метода основана на использовании измерений параметров радиосигналов на трассе *спутник – наземный пункт* по наблюдениям с одного пункта (рис. 1). В этом случае соответствующее интегральное уравнение первого рода не имеет аналитического обращения и требует разработки методов обращения в классе решения т.н. некорректных задач. Для эффективного использования метода радиопросвечивания в системе автоматизированного определения высотного распределения электронной концентрации предложен алгоритм решения обратной задачи, допускающий получение параметров ионосферы вдоль всей траектории подионосферной точки.

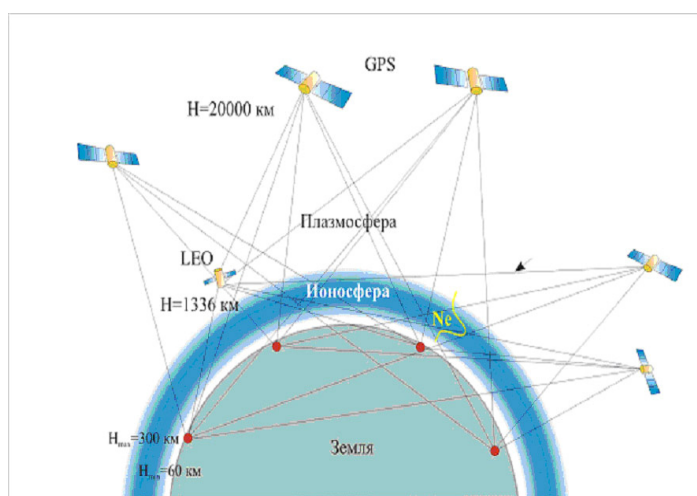


Рис. 1. Конфигурация спутников, используемая в радиофизических методах зондирования

На основе результатов численного моделирования показано, что среднеквадратическая ошибка определения функции высотного распределения электронной концентрации ионосферы Земли равна $\delta_N = 0,02NU$ ($1NU = 10^6$ эл/см³). Это составляет менее 2,5 % от значения максимума электронной концентрации. Непосредственно, значение максимума ионосферы определяется с ошибкой не хуже 2 %: расхождение между моделируемым значением и восстановленным из решения обратной задачи составляет $\delta_N = 0,014NU$. Разработаны и апробированы на реальных

данных измерений алгоритмы и программные средства, предназначенные для решения обратной задачи радиопросвечивания на трассе спутник–Земля с целью определения высотного распределения электронной концентрации ионосферы Земли с разрешением по высоте от 5 до 40 км и с временным шагом вдоль подионосферной трассы 30 с. Восстановленный по навигационным данным профиль и данные ионозонда вертикального зондирования показаны на рис. 2.

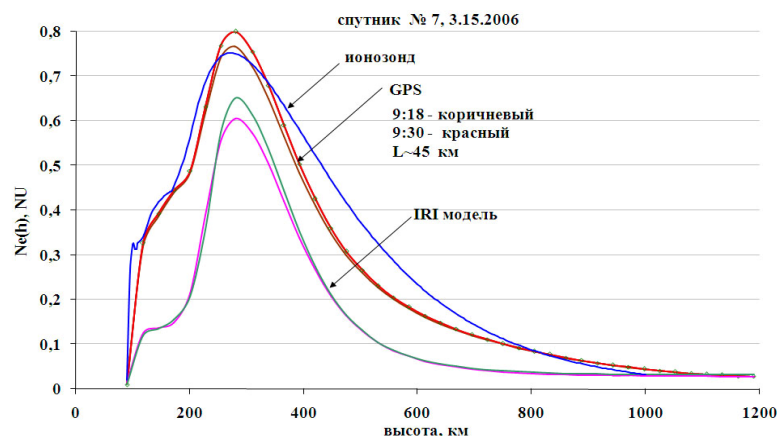


Рис. 2. Сравнение результатов восстановления по наблюдениям спутников GPS с данными ионозонда (Grahamstown, ЮАР)

Показано, что применение сигналов навигационных спутниковых систем дает возможность определять профили электронной концентрации ионосферы в любое время суток практически для любого региона поверхности Земли (рис. 3). Эта возможность основана на использовании универсальных навигационно-геодезических приемников, позволяющих принимать сигналы навигационных спутников практически в любой точке земной поверхности. Зона действия одного такого приемника охватывает область, радиус которой может составлять более 1000 км.

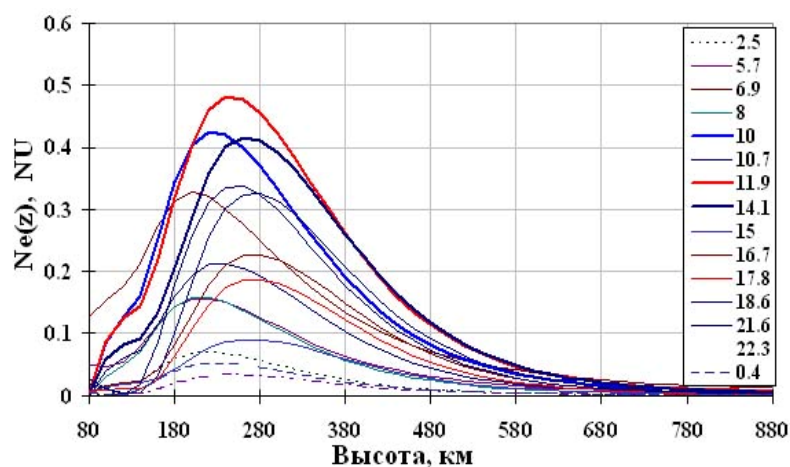


Рис. 3. Временные вариации высотных профилей электронной концентрации, полученные по данным спутников GPS

По результатам экспериментальной обработки данных измерений показана принципиальная возможность определения азимутально-временных вариаций состояния ионосферы Земли по однопозиционным наземным измерениям. Исследована возможность реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы на основе метода радиопросвечивания (рис. 4). Дана оценка возможности построения двух - трехмерной структуры регулярных параметров ионосферы и приведены результаты экспериментальной реализации.

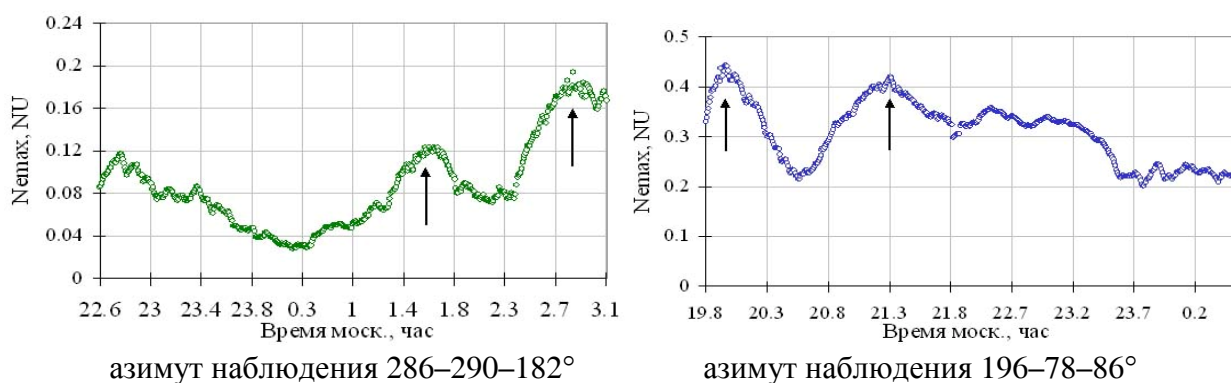


Рис. 4. Вариации максимума электронной концентрации ионосферы, полученные по наблюдениям двух спутников для пересекающихся азимутальных направлений

Доказана эффективность применения этого метода при детектировании ионосферных возмущений во время гелиофизических процессов на Солнце и антропогенных эффектов на Земле. Показано, что форма отклика ионосферы на прямой эффект солнечной вспышки имеет разную структуру в Северном и Южном полушариях Земли (рис. 5).

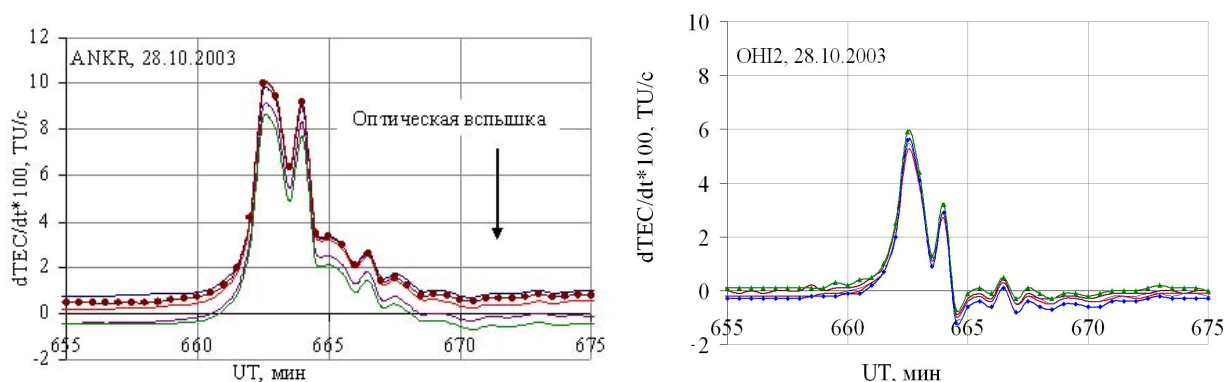


Рис. 5. Реакция ионосферы на прямой геомагнитный эффект солнечной вспышки 28 октября 2003 г. для северного и южного полушарий

На основе материалов обработки реальных данных навигационных измерений доказана принципиальная возможность исследования методом радиопросвечивания ионосферной изменчивости в период сейсмических событий. Получены оценки пространственно-временного разрешения метода радиопросвечивания на трассе спутник-Земля при определении параметров

ионосферы применительно к задаче детектирования сейсмоионосферных вариаций. Показано, что для локализации области ионосферного возмущения необходимо проводить мониторинг с разрешением по поверхности Земли не хуже $2 \times 2^\circ$ (200×200 км).

Проведен мониторинг ионосферы в период подготовки и прохождения сейсмических событий в различных регионах земного шара и разном уровне геомагнитной активности. Показано, что сейсмоионосферные вариации могут быть эффективно зарегистрированы при использовании метода радиопросвечивания на трассе навигационный спутник-Земля. На основе результатов обработки данных, полученных с использованием навигационных систем, доказано, что над эпицентром будущего землетрясения происходит нарушение пространственно-временного хода электронной концентрации ионосферы. Такая модификация профиля наблюдается за 1–3 сут до предстоящего события (рис. 6, 7). Показано, что на основе анализа пространственно-временной структуры высотного профиля электронной концентрации возможно прогнозировать месторасположение будущего эпицентра землетрясения.

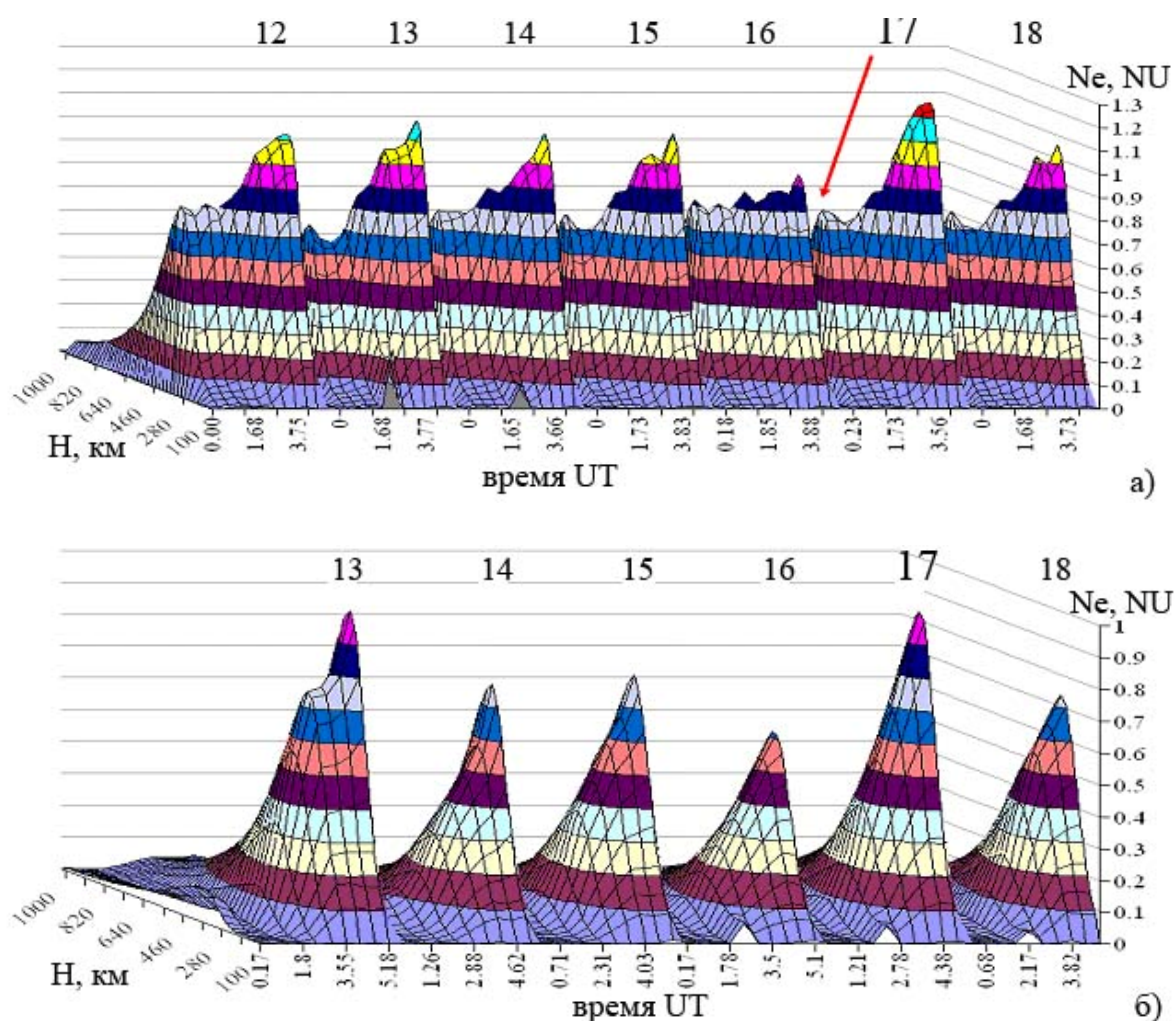


Рис. 6. Профили электронной концентрации (3D-представление) вблизи (а) и вдали (б) от эпицентра землетрясения (Турция, Измит, 16 августа 1999 г.)

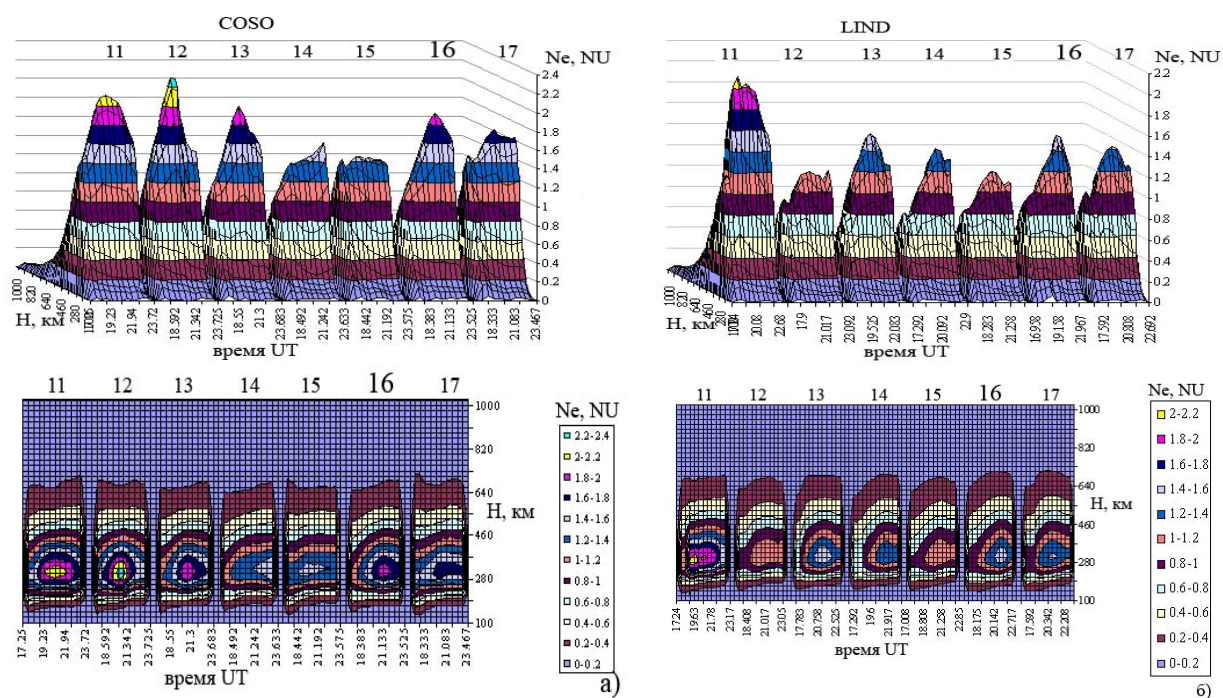


Рис. 7. Профили электронной концентрации (3D-представление) и их двумерное отображение (2D) вблизи (а) и вдали (б) от эпицентра (США, Hector Mine, 16 октября, 1999 г.)

Показана эффективность построения на основе использования существующей штатной наземной аппаратуры и метода решения обратной задачи автоматизированной технологии обработки навигационных данных для практической реализации метода радиопросвечивания на трассе спутник-Земля, предназначенного для непрерывного мониторинга ионосферы с использованием сигналов навигационных систем GPS и ГЛОНАСС.

2.1.4. ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМ. В.И. ВЕРНАДСКОГО РАН

2.1.4.1. Магеллан: Проект США (1990–1994)

1.1. *Выполнен геологический анализ и картирование радарных изображений на Область Бета на Венере.* Это 2000×2500 км вулканотектоническое поднятие и примыкающие региональные вулканические равнины. В ходе этого исследования выделены и закартированы 8 вещественных и 3 тектонических подразделения. Показано, что их взаимоотношения согласуются с гипотезой образования вулканотектонического поднятия за счет активности крупного мантийного диапира. Определены временные рамки этой активности — несколько сотен миллионов лет. Результаты работы опубликованы в виде статьи в международном журнале *Icarus*. Составленная в ходе этого исследования геологическая карта масштаба 1:5 00 000 (рис. 1) принята для публикации Геологической службой США.

Работа выполнена совместно с Университетом Брауна, г. Провиденс, США.

1.2. *Выполнен геологический анализ и картирование радарных изображений на Область Милитты на Венере.* Геология этой области описывается 11 вещественными и 2 тектоническими подразделениями, стратиграфические пределы которых постоянны в пределах картируемой области. Главная особенность этого региона — присутствие одной из крупнейших корон на Венере (Кецальпетлатль, 800 км в диаметре), которая венчает сводовое поднятие в восточной части Земли Лада. Поднятие и корона представляют собой мощные источники молодого вулканизма, связанного с восходящими мантийными потоками. Центры вулканизма расположены на краю глубокой региональной депрессии равнины Лавинии, формирование которой связано с нисходящими мантийными потоками и предшествовало вулканизму сводового поднятия Земли Лада. Результаты работы опубликованы Геологической службой США в виде карты масштаба 1:5 000 000, Map I-2832 (рис. 2).

Работа выполнена совместно с Университетом Брауна, г. Провиденс, США.

1.3. *На основании многолетних исследований геологии Венеры предложен новый подход к выбору мест посадки на этой планете аппаратов, которые должны изучать состав материала поверхности.* Суть подхода в том, что на глобальной карте планеты выделены зоны, где в материале поверхности с высокой вероятностью присутствует вещество выбросов из удаленных наветренных (на Венере постоянно с востока на запад дует мощный ветер) ударных кратеров. Эти выбросы содержат материал геологических комплексов о природе и возрасте которых мы можем

лишь догадываться. В то же время для понимания геолого-геохимических процессов на Венере, в первую очередь, необходимо провести геохимический анализ вещества тех комплексов, которые видны на поверхности и для которых получены морфологические свидетельства их природы. Нами выделены 13 перспективных мест посадки (рис. 3), находящихся за пределами зон неконтролируемых загрязнений и представляющих 5 наиболее интересных и до сих пор не изученных геологических комплексов. Результаты работы опубликованы в виде статьи в международном журнале *Planetary and Space Science*.

Работа выполнена совместно с Университетом г. Оулу, Финляндия, и Университетом Брауна, г. Провиденс, США.

2.1.4.2. Вега / Джотто, Дип Спейс, Стардаст, Дип Импакт: проекты СССР, ЕКА и США

1.4. Геолого-морфологический анализ изображений ядер 4 комет (Галлея, Боррелли, Вильд-2 и Темпель-1) показал наличие на них кратеров, по-видимому, ударных, и ряда форм с уплощенной поверхностью: потоковидных образований, мес, террас, плоских днищ кратеров (рис. 4). Образование форм с уплощенной поверхностью, вероятно, связано с процессом планации, ключевую роль в котором в ряде случаев играло спровоцированное сублимацией льдов обрушение склонов и распластывание обрушившегося материала. Протяженные слои, наблюдаемые на снимках кометы Темпель 1, возможно образовались на стадии аккреции протокометных тел при сминании очень рыхлых аккретирующих кометезималей. Сделан вывод, что вещество поверхности ядер комет существенно преобразовано рядом процессов, что следует учитывать при планировании миссий к кометам. Результаты работы опубликованы в виде статей в журналах *Астрономический вестник* и *Planetary and Space Science*.

Работа выполнена совместно с Институтом изучения Солнечной системы, Катленбург-Линдау, Германия.

2.1.5. ИНСТИТУТ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ РАН

Исследование функционального состояния различных систем человека и животных при воздействии факторов космического полета является одним из основных вопросов космической биологии и медицины. Значение таких исследований заключается в необходимости создания научной базы для проектирования будущих все более длительных полетов в космос.

В 2006–2007 гг. в рамках реализации Долгосрочной программы научно-прикладных исследований на российском сегменте Международной космической станции (МКС) были завершены четыре медико-биологических эксперимента в области космической медицины и физиологии — «Спрут», «Пульс», «Пилот», «Гематология» и два эксперимента в области космической биологии — «Межклеточное взаимодействие» и «Статокония».

Эксперимент «Спрут» — исследование состояния жидких сред организма человека в условиях длительного космического полёта (рис. 1). Целью эксперимента являлось получение данных о состоянии жидкостных сред организма человека в условиях длительного космического полета с целью оценки состояния адаптационных механизмов и усовершенствования мер профилактики неблагоприятного влияния невесомости применительно к условиям полета на борту МКС.

В эксперименте «Спрут» приняли участие 12 российских космонавтов из составов основных экипажей на МКС, начиная с первой основной экспедиции.



Рис. 1. Выполнение эксперимента «Спрут» на борту МКС во время полета

Впервые показано развитие гипогидратации организма человека в условиях длительного космического полета, при этом соотношение внутриклеточного и внеклеточного объемов жидкости демонстрирует равномерное развитие дефицита жидкости в этих жидкостных секторах организма.

Эксперимент «Пульс» — исследование вегетативной регуляции кардиореспираторной системы (рис. 2).

Целью эксперимента являлось получение новой научной информации для углубления представлений о механизмах адаптации кардиореспираторной системы к условиям длительного космического полета.

Исследования вегетативной регуляции кардиореспираторной системы в полетах МКС-6- МКС-13 показали, что эксперимент «Пульс» позволил получать важную диагностическую и прогностическую информацию о механизмах функционирования этой системы в условиях невесомости.



Рис. 2. Космонавт Н.М. Бударин при проведении эксперимента «Пульс»

Эксперимент «Пилот» — исследование индивидуальных особенностей регулирования психофизиологического состояния и надёжности профессиональной деятельности космонавта в космическом полёте (рис. 3). Эксперимент «Пилот» проводился с участием российских и американских членов экипажей МКС-7 – МКС-14.



Рис. 3. Бортинженер МКС-14 М.В. Тюрин выполняет эксперимент «Пилот-Р» на борту МКС во время полета

По завершении эксперимента были разработаны рекомендации к совершенствованию эргономических характеристик рабочего места космонавта и конструкции фиксации космонавта на рабочем месте.

Эксперимент «Гематология» – исследование морфофункциональных свойств клеток крови и интенсивности эритропоэза у человека при воздействии факторов космического полёта

Целью эксперимента «Гематология» являлось получение новых данных о влиянии факторов космического полёта на систему крови человека, расширение диагностических и прогностических возможностей, выявление механизмов возникновения сдвигов в гематологических показателях («космическая анемия») и выдача рекомендаций о необходимости использования профилактических и фармакологических средств, корректирующих неблагоприятное влияние на организм человека условий космического полёта.

Начиная с 6-й экспедиции на МКС было проведено исследование состояния красной крови в фоновом периоде, в условиях космического полета и первые две недели после его завершения.

Эксперимент «Межклеточное взаимодействие» — изучение в условиях микрогравитации широкого круга событий, связанных с клеточными контактами и, в частности, функциональной активности лимфоцитов-естественных киллеров (ЕК) в процессе взаимодействия с клеткой-мишенью в клеточных культурах, экспонированных на борту МКС. Эксперимент был начат в экспедиции МКС-7 и продолжен в ходе последующих пяти экспедиций посещения на кораблях «Союз» (рис. 4).

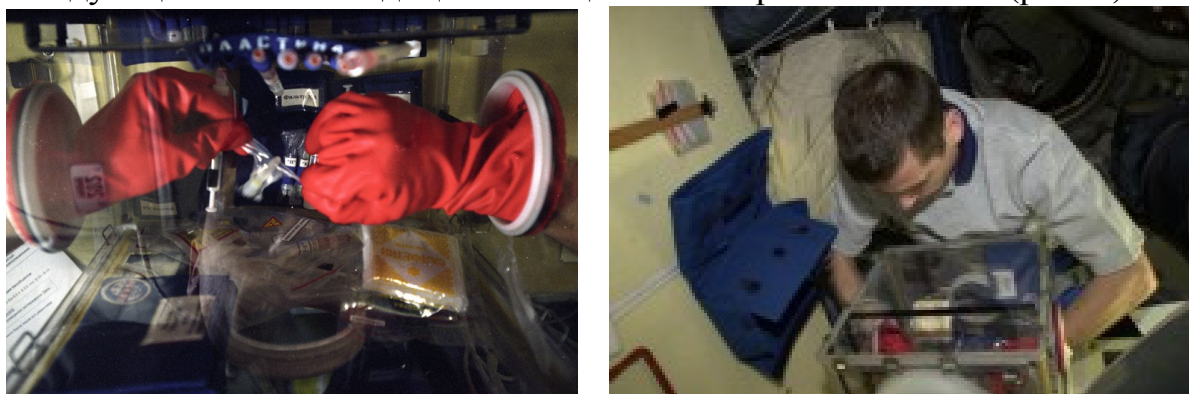


Рис. 4. Выполнение эксперимента «Межклеточное взаимодействие» на борту МКС во время полета

Задачей исследования являлось изучение межклеточного взаимодействия лимфоцитов – естественных киллеров с опухолевыми клетками в условиях микрогравитации *in vitro*.

Эксперимент «Межклеточное взаимодействие» был выполнен российскими космонавтами экипажей основных экспедиций в период МКС-7 – МКС-12 в течение первых и вторых суток после стыковки. В результате проведенного эксперимента было установлено, что: лимфоциты ЕК человека могут распознавать и контактировать с клетками-мишенями (миелобласты линии К-562) в суспензии во время инкубации в условиях микрогравитации; лимфоциты ЕК могут реализовать свой цитотоксический эффект при

взаимодействии с высокоспецифическими клетками-мишенями. В условиях микрогравитации выявлена тенденция к повышению цитотоксичности ЕК клеток человека при их инкубации *in vitro* с клетками К-562.

Отличия в активности лимфоцитов доноров могут зависеть от исходных потенциальных возможностей клеток — естественных киллеров и индивидуальных особенностей донора.

В эксперименте «Статокония» — оценка характера и динамики новообразования и роста статоконий у брюхоногих моллюсков (виноградная улитка) под воздействием невесомости предусматривалось решение задач, связанных с изучением ультраструктуры и элементного состава, морфометрии, генерации и роста статоконий после извлечения из статоконистов «старых» статоконий (рис.5).

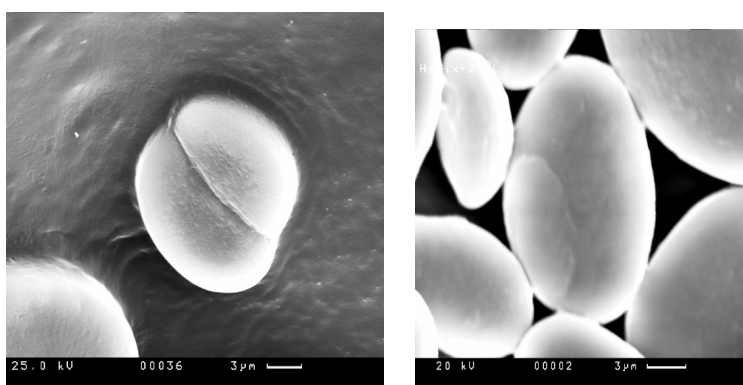


Рис. 5. Длительная экспозиции в невесомости (более 100 дней) привела к изменениям морфологических параметров статоконий

Во всех полетных экспериментах было обнаружено достоверное увеличение основных морфологических параметров статоконий: длины, ширины, периметра и площади, и с возрастанием продолжительности экспозиции в невесомости выявлялась тенденция их дальнейшего возрастания по сравнению с контрольными значениями. Было показано также, что основной минеральный элемент, придающий статокониям тяжесть, — это карбонат кальция в виде кристаллов арагонита.

Биологические эксперименты в полетах беспилотных (автоматических) космических аппаратов

В 2007 г. осуществлен полет КА «Фотон-М» № 3 — 12 суток (14.09.07–26.09.07). Запуск КА «Фотон-М» № 3 был осуществлен с космодрома «Байконур». Посадка спускаемого аппарата произведена в районе г. Кустаная (Казахстан).

Исследования в полетах КА «Фотон-М» № 3 позволили внести ясность в понимание закономерностей адаптации живых систем, стоящих на различных уровнях филогенетического развития, к условиям невесомости. В полете были проведены эксперименты с микроорганизмами, виноградными улитками, тритонами, ящерицами и монгольскими песчанками. Все эти

эксперименты были российскими, при этом Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук являлся ответственным исполнителем этих экспериментов. В проведении пред- и послеполетных исследований биоматериала принимали участие многие российские научные учреждения. Российская сторона пригласила также специалистов НАСА принять участие в проведении четырех биологических экспериментов (эксперименты «Рецептор», «Регенерация», «Геккон» и «Плазмида»).

Эксперимент «Роденция». Был проведен ряд исследований, направленных на испытание новой тестовой биологической модели — монгольской песчанки (*Meriones unguiculatus*). В ходе послеполетных исследований были получены данные о состоянии нервной, мышечной, костной систем, желудочно-кишечного тракта, зрительного аппарата, водно-электролитного баланса. У монгольских песчанок с их способностью к высокому осмотическому концентрированию мочи обнаружены некоторые различия по сравнению с крысами в реакциях адаптации различных физиологических систем к невесомости.

Эксперимент «Рецептор». В эксперименте с виноградными улитками (*Helix lucorum* L.) установлена важная роль гена *prgrоHРeP*, кодирующего регуляторные пептиды волосковых клеток статоциста — органа гравитации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что такая простая экспериментальная модель, как улитка может быть использована для описания субклеточных механизмов адаптации в гравирецепторах в связи с пребыванием в условиях невесомости.

Эксперимент «Регенерация». Тритоны (*Pleurodeles Waltlii*) являются хорошо зарекомендовавшей себя экспериментальной моделью для изучения влияния факторов космического полета, прежде всего невесомости и ионизирующей радиации, на процессы регенерации и другие функции организма. Выявлено модифицирующее влияние невесомости на процесс регенерации тканей и органов (хрусталик, конечности, хвост) у тритонов через изменение экспрессии генов *FGFβ* и *HSP90*, участвующих в механизмах деления, дифференцировки и апоптоза клеток.

Эксперимент «Геккон». Исследование продолговатого мозга выявило цитологические изменения в нейронах вестибулярных ядер у полетной группы ящериц-гекконов (*Pachydactylus turneri*). Полученные результаты показывают, что потеря костной массы происходит только у животных, которые чувствительны к механическим нагрузкам. В эксперименте выявлены те же закономерности адаптации к невесомости, что и у млекопитающих.

Эксперимент «Плазмида». При скрещивании в полете штаммов микроорганизмов *E.coli* и *Streptomyces lividans* 66 (pIJ 702) установлено, что

в невесомости конъюгативный перенос плазмид pIJ 702 из клеток *E.coli* в клетки *Streptomyces lividans* 66 происходит с большей интенсивностью, чем на Земле, что приводит к появлению потомства с новыми генетическими характеристиками.

Следующие этапы проведения биологических экспериментов запланированы на 2010 г. в 30 суточном полете КА «Бион-М» № 1 и на 2011 г. в полете КА «Фотон-М» № 4. В научной программе этих полетов предусматривается проведение экспериментов на различных млекопитающих (мыши, песчанки), низших позвоночных (гекконы), моллюсках (улитки), насекомых, микроорганизмах. Планируется расширение исследований по биотехнологии и астробиологии. В настоящее время ведутся переговоры со специалистами различных космических агентств об их возможном участии в программе проведения полетных экспериментов.

2.1.6. НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На фазе спада 23-го цикла солнечной активности проведены измерения различных видов космических излучений на борту нескольких ИСЗ приборами, разработанными и созданными в НИИЯФ МГУ. Выполнены экспериментальные исследования на полярных ИСЗ «КОРОНАС-Ф», «Татьяна», «Метеор-3М», Международной Космической Станции и «ГЛОНАСС». Получен большой объем новых экспериментальных данных.

2.1.6.1. Проект КОРОНАС-Ф

Российский спутник КОРОНАС-Ф (К-Ф) был запущен 30 июля 2001 г. на орбиту с высотой ~520 км и наклоном орбиты к плоскости экватора 83°. На спутнике КОРОНАС-Ф НИИЯФ МГУ была установлена аппаратура, которая измеряла потоки нейтрального излучения во время солнечных вспышек: рентгеновское и гамма излучения с энергией от 0,03 до 200 МэВ, нейтронов с энергией >20 МэВ, а также потоки электронов 0,3–108 МэВ, протонов 1–90 МэВ и ядер 2–40 МэВ/нуклон.

Результаты исследований солнечных космических лучей (СКЛ) в магнитосфере Земли

Основные результаты были получены в области исследования проникновения СКЛ в магнитосферу и процессов захвата протонов СКЛ с энергией 1–15 МэВ в магнитосферную ловушку во время магнитных бурь.

Проникновение СКЛ в магнитосферу

На рис. 1 приведен пример движения границ проникновения СКЛ в магнитосферу (ГП) во время серии сильных бурь в октябре 2003 г. Сплошной линией показан график изменения Dst вариации. Было показано, что резкий сдвиг к Земле ГП может наблюдаться до минимума Dst под действием импульса давления солнечного ветра. Обнаружено воздействие суббуревой активности на ГП. Существенные сдвиги ГП имеют место во время цепочки суббурь в отсутствии магнитной бури (Рис. 1).

Захват протонов СКЛ

Измерения на К-Ф во время нескольких сильных магнитных бурь 2001–2004 гг. позволили обнаружить и подробно исследовать механизм захвата

солнечных протонов с энергией 1–15 МэВ во время фазы восстановления бури. Впервые эффект раздвоения ГП протонов малых энергий, показанный на рис. 2, был обнаружен по измерениям 30–31 октября 2003 г. и подтвержден измерениями во время магнитных бурь в ноябре 2001 г. и июле и ноябре 2004 г. Ни в одном из этих событий эффект инжекции импульсом Sc не был обнаружен.

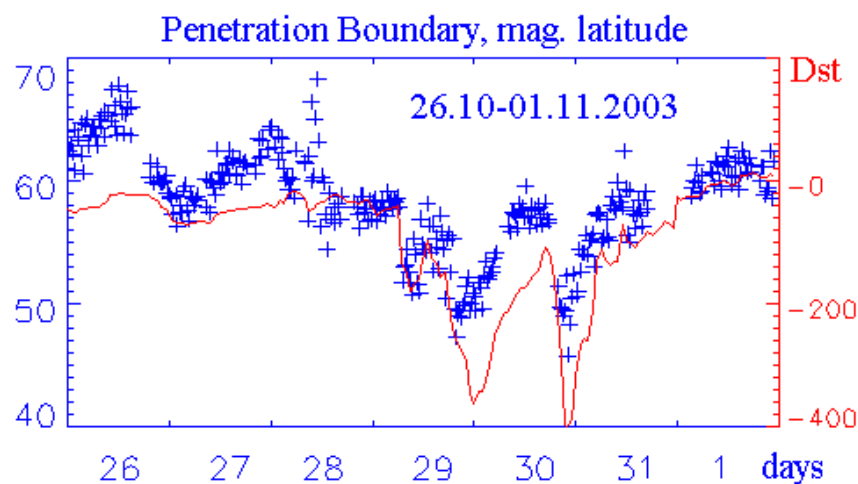


Рис. 1. Динамика границы проникновения во время суббурь (26–27.10.2003) и цепочки магнитных бурь 29–31.10.2003. Непрерывная линия — Dst -индекс

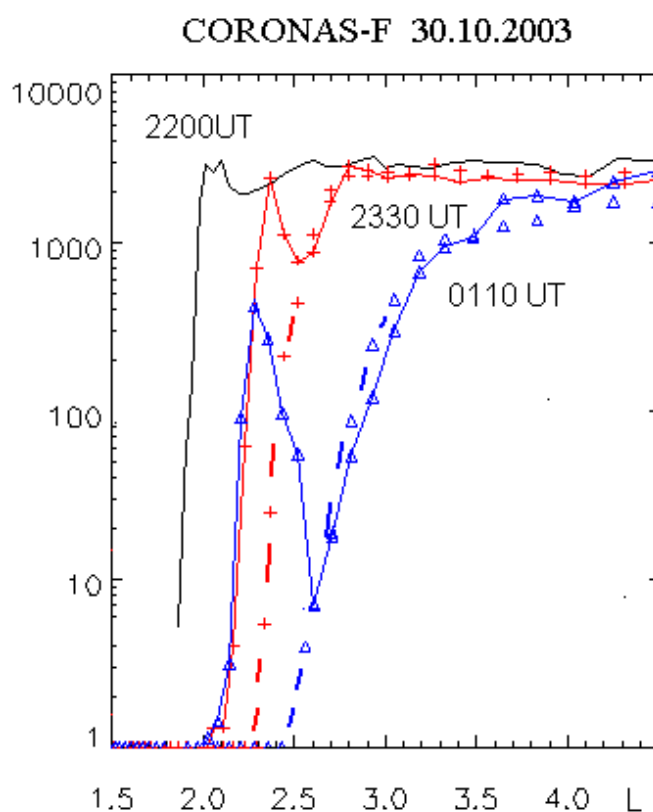


Рис. 2. Эффект двойной границы проникновения в канале 1–5 МэВ (непрерывная линия) и одиночной границы в канале 50–90 МэВ: сдвиг во вне удаленной ГП и захват 1–5 МэВ протонов на $L = 2–2,5$

При пролете над Бразильской магнитной аномалией зарегистрирован свежезахваченный пояс солнечных протонов (рис. 3). Во время сложного возмущения 30 октября – 4 ноября 2003 г. было образовано три таких пояса.

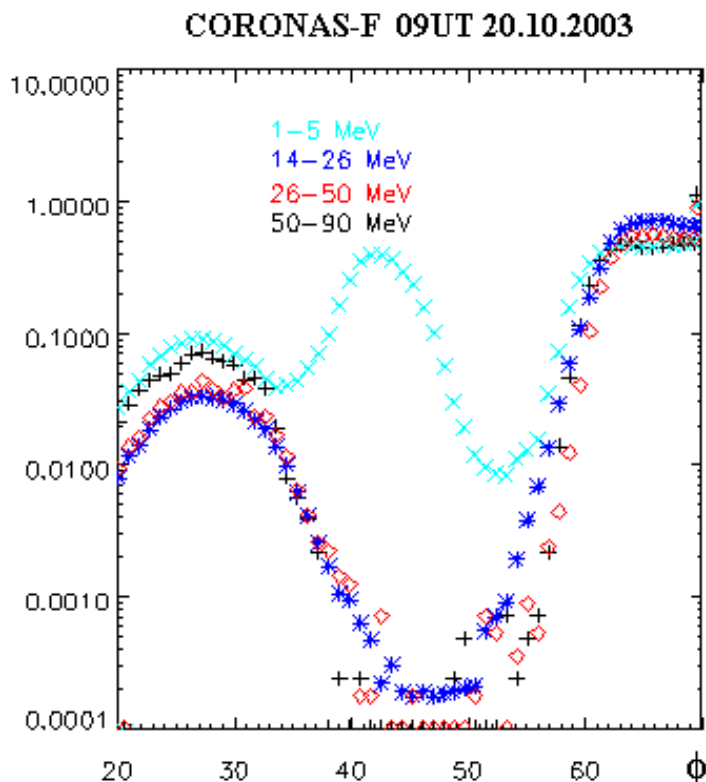


Рис. 3. Новый солнечный протонный радиационный пояс, зарегистрированный в области Бразильской магнитной аномалии

Результаты исследований рентгеновских и гамма излучений

Анализ данных ИСЗ «Коронас-Ф» показал, что наиболее энергичные гамма-кванты в солнечных вспышках с энергией до 300 МэВ представляют собой результат распада нейтральных пионов, рожденных в атмосфере Солнца при взаимодействии субрелятивистских протонов с веществом. Сопоставление времени регистрации высокоэнергичных гамма-квантов со временем начала регистрации наземных возрастных космических лучей показало, что ускорение протонов может происходить в компактной области солнечной вспышки.

Инструмент СОНГ на борту Коронас-Ф регистрировал рентгеновские и гамма излучения (рис. 4–6) с высоким временным разрешением и хорошим энергетическим разрешением в диапазоне энергий 0,05–300 МэВ в мощных солнечных вспышках: а именно 28.10, 04.11.2003 и 20.01.2005. Результаты измерений СОНГ дали уникальную информацию об эволюции спектров электронов и протонов вспышки.

Можно показать, что в данной вспышке:

а) доминирует высокоэнергичное тормозное излучение, которое имеет место до 30–100 МэВ в первом событии ускорения;

б) гамма излучение высокой энергии до 90 МэВ в поздних фазах вспышек, несомненно, вызывается распадом пионов. Это излучение означает резкое появление протонов с энергией >300 МэВ, которое взаимодействует с солнечной атмосферой.

в) точное время излучения, вызванного распадом пионов, было измерено с точностью ± 2 с, что дает в свою очередь несомненную картину появления ускоренных частиц на Солнце.

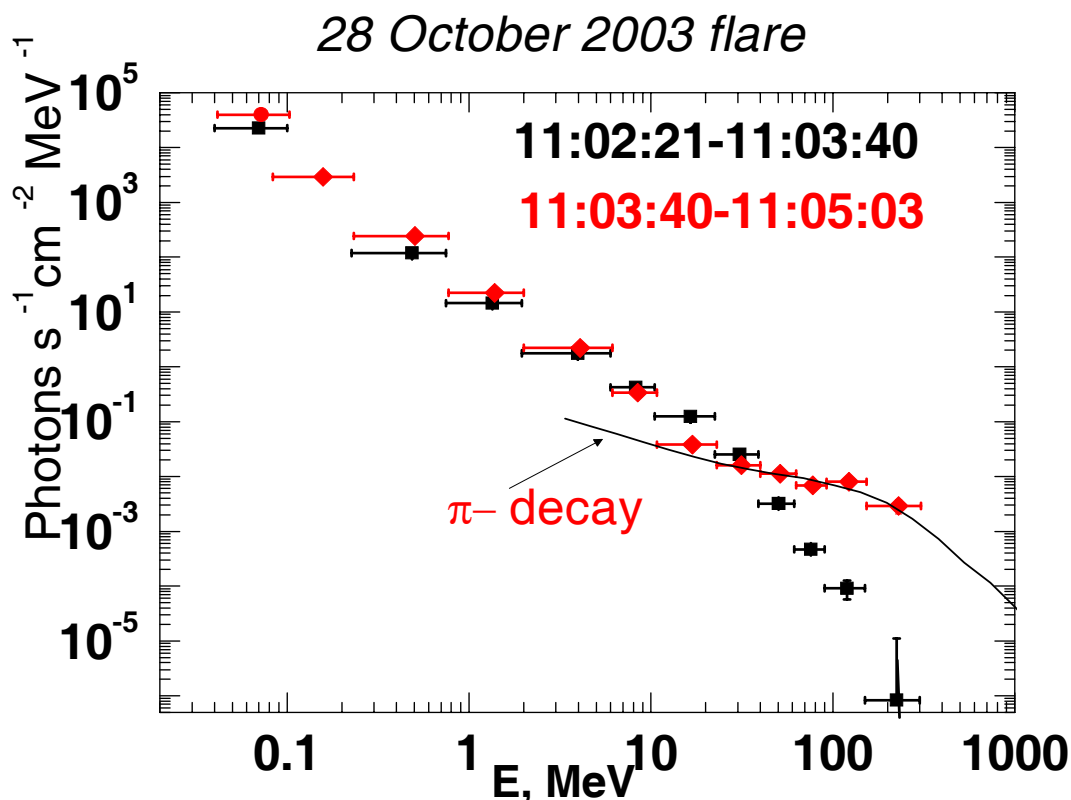


Рис. 4. Динамика спектра гамма лучей, измеренная прибором СОНГ. Черная линия показывает спектр распада пионов

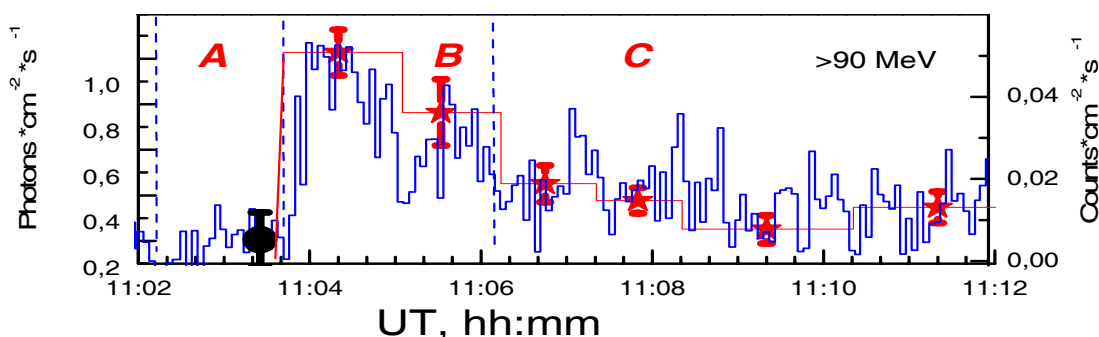


Рис. 5. Временной профиль гамма излучений вспышки 28 октября 2003 г. Голубая линия – скорость счета прибором СОНГ на энергии >90 МэВ (шкала справа), красная линия – вычисленный поток гамма лучей при распаде пионов (шкала слева). Вертикальные штриховые линии показывают фазы вспышки

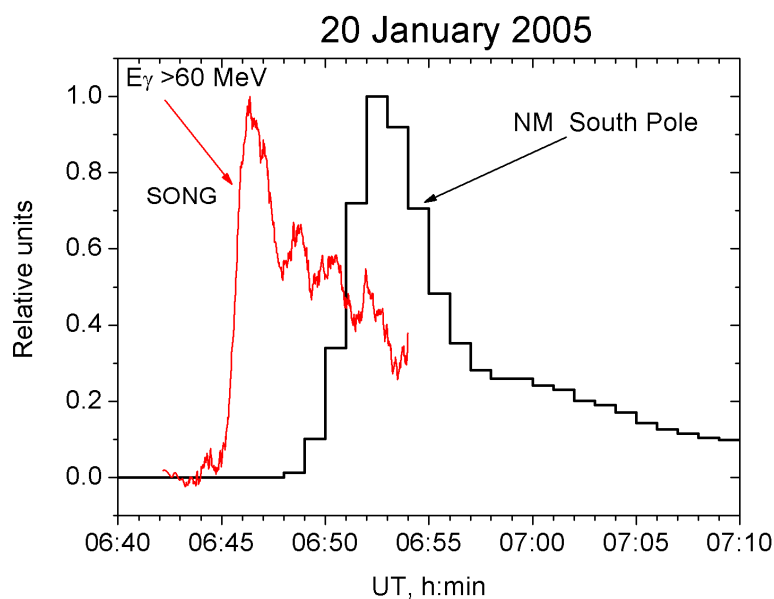


Рис. 6. Временной профиль гамма излучения, измеренного прибором СОНГ и временной профиль наземных возрастаний солнечных космических лучей, измеренный нейтронным монитором на Южном полюсе

2.1.6.2. Проект «Татьяна»

Успешно работал запущенный к 250-летию МГУ 20 января 2005 г. на полярную круговую орбиту с наклоном 82° с высотой 950 км малый спутник «Университетский-Татьяна», оснащенный научной аппаратурой, созданной в НИИЯФ при активном участии аспирантов и студентов физического факультета МГУ. Получен большой объем экспериментальной космофизической информации, которая легла в основу создания базы данных космических экспериментов НИИЯФ.

В 2007 г. данные спутника «Университетский-Татьяна» по ближнему ультрафиолетовому (УФ) излучению (с длинами волн 300–400 нм) были обработаны и проанализированы. В процессе глобального анализа интенсивности УФ-излучения было показано, что максимальная интенсивность регистрируется на высоких широтах в области авроральных свечений (интенсивность порядка 10^9 фотон/см²·с·стер). Минимальная интенсивность измеряется около геомагнитного экватора: порядка $3 \cdot 10^7$ фотон/см²·с·стер. В то же самое время на многих пролетах спутника Татьяна наблюдалась промежуточная интенсивность порядка 10^8 фотон/см²·с·стер на широтах 10–40° вокруг геомагнитного экватора, что формировало два спорадических «пояса».

Результаты измерений УФ транзиентных событий, измеренных на спутнике Татьяна в 2005–2007 гг. показаны на рис. 7. Мировая карта событий имеющих временную протяженность 1–64 мс и выделение энергии в ультрафиолетовом диапазоне 10 кДж – 1 МДж показывает, что они концентрируются около экватора (80 % событий на широтах $\pm 30^\circ$). Они с равной вероятностью происходят над океанами и над континентами.

Детекторы «Татьяны» могли работать не только в безлунные ночи, но и при полной луне. Анализ яркости (выделения энергии) и скорости УФ событий зарегистрированных в эксперименте Татьяна показал, что существует корреляция УФ транзитных событий с фазой луны. Зарегистрированы два пика скорости событий: при новой луне и при полной луне. Наиболее яркие события были зарегистрированы при полной луне.

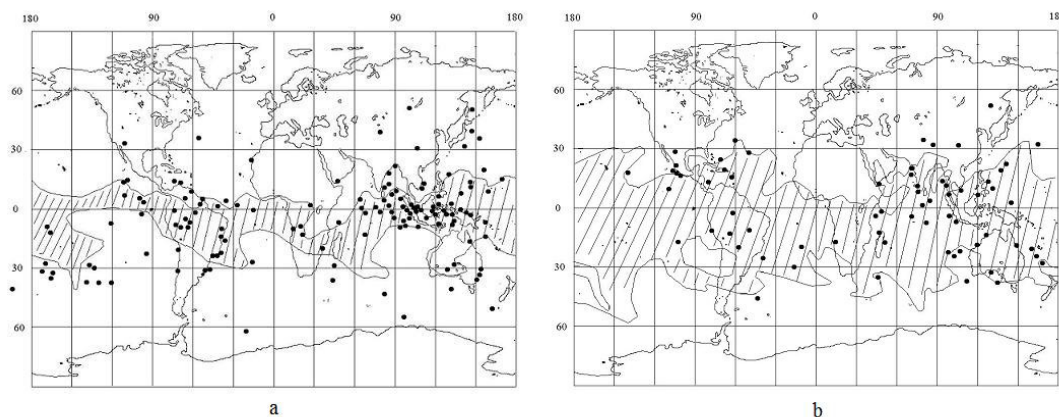


Рис. 7. Мировая карта УФ-событий, измеренных детектором спутника Татьяна: *а* – события при полной луне (заштрихована область с интегральной плотностью водяных паров $>5 \text{ г/см}^2$); *б* — события при новолуниях (заштрихована область с интегральной плотностью водяных паров $>3 \text{ г/см}^2$)

2.1.6.3. Результаты теоретического изучения и моделирования процессов на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли

Процессы на Солнце

Проведено численное моделирование «ячеечного» МГД-динамо во вращающейся сферической оболочке. Получены результаты для случаев толстой и тонкой конвективной оболочки в рамках предположения, что конвективные ячейки могут быть связующим звеном между глобальными и локальными солнечными МГД-процессами. В первом случае наблюдается поддержание крупномасштабного магнитного поля. Данное поле время от времени (хотя и не регулярно) испытывает обращения полярности, наряду с формированием локальных — во многих случаях биполярных — магнитных конфигураций. Показано, что локальные магнитные поля при этом привязаны к определенным неизменным широтным зонам, поскольку крупномасштабные конвективные ячейки сохраняют свое расположение. Во втором случае процесс генерации локальных полей не имеет такой четкой локализации, обращений полярности общего поля не происходит.

Выработан критерий, по которому в наблюдательных данных можно отличить случаи действия двух механизмов формирования локальных магнитных полей в солнечных активных областях — механизма всплывающей трубки и конвективного механизма. Проведено сравнение

результатов моделирования с данными экспериментальных наблюдений. Проанализированы магнитограммы полного вектора поля и доплерограммы, полученные на солнечном телескопе и на инструменте SOHO MDI. Наблюдаемая картина сопоставлялась с выводами численных экспериментов по моделированию МГД-конвекции. Показано, что полученные результаты находятся в лучшем согласии с представлениями о конвективном механизме формирования магнитных полей, чем с идеей всплывания трубки. Исследование изображений солнечной грануляции позволило сделать вывод о широком распространении конвективных течений валикового типа в подфотосферных слоях Солнца.

Проведена серия численных расчетов и получены решения полной системы уравнений одножидкостной диссипативной магнитной гидродинамики с учетом эффекта Холла для природной среды. Исследовано структурирование разреженной солнечной плазмы в процессе эволюции осесимметричной плазменной магнитной конфигурации. Начальное магнитное поле считалось локализованным в ограниченном объеме безграничной среды. Совместное использование аналитических и численных методов исследования привело к выводу о существовании в солнечной плазме особых магнитных структур — двух очень тонких магнитных трубок с противоположно направленным магнитным потоком, плотно прилегающих друг к другу по всей длине.

В исследовании солнечной короны, теоретически и из анализа наблюдений показано, что корональные выбросы массы и солнечные вспышки могут происходить без заметных изменений топологии крупномасштабных магнитных полей. Развита простая и наглядная сценария, удовлетворительно объясняющая основные наблюдательные особенности эруптивных явлений на Солнце, зарегистрированных в эксперименте SOHO, а также на ИСЗ TRACE и GOES-12. Показано, что глобальные корональные выбросы массы включают выброс сложных систем магнитного потока, распределенного на больших пространственных масштабах превышающих несколько активных областей и сравнимых с половиной солнечного диска.

Разработан новый способ визуализации магнитного поля в короне Солнца. В качестве исходной информации используются коэффициенты гармонического разложения в потенциальном приближении, вычисленные по наблюдениям поля на фотосферном уровне. Трехмерные уравнения для линий поля интегрируются численно, а результаты представляются в виде проекций на картинной плоскости. Метод удобен для применения в исследовательских и прикладных работах по изучению и прогнозированию «космической погоды».

На основе методов безразмерного масштабного анализа солнечных и гелиосферных процессов создана новая классификация корональных выбросов массы по их скорости относительно фоновой плазмы. Эта классификация более объективно отражает различные ситуации и типы течений с быстрыми, средними и медленными скоростями плазмы в короне Солнца.

Найдена эмпирическая формула, описывающая зависимость $V(S)$ среднесуточной скорости солнечного ветра V от площади корональных дыр S на видимой стороне Солнца в виде ряда Тэйлора первого и второго порядка.

Процессы в магнитосфере Земли

Проведены теоретические исследования динамики процессов в магнитосфере Земли и выполнено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными:

Определен ряд характеристик низкоширотного погранслоя (LLBL) на базе данных спутниковых наблюдений. Показано, что результаты наблюдений подтверждают предсказания разработанной теории, объясняющей формирование толстого LLBL при северной ориентации ММП и тонкого LLBL при южной ориентации.

Проведен статистический анализ результатов наблюдений продольных токов на спутнике «Интеркосмос-Болгария-1300» с учетом конечного размера наблюдаемых токовых структур. Определены зависимости вероятности наблюдения токового листа с фиксированной толщиной и плотности тока в листе от толщины листа.

Разработана модель ускорения авроральных частиц двойными слоями, принимая во внимание процесс модификации функций распределения. Учтено, что в большинстве случаев экспериментально измеренные функции распределения хорошо аппроксимируются каппа распределением.

Развита теория плазменного транспорта во время магнитных бурь. Выделены процессы, приводящие к интенсивному заполнению магнитных силовых трубок ионами ионосферного происхождения, что может рассматриваться в качестве одного из определяющих факторов буревой динамики.

Изучение характеристик магнитосферной турбулентности, включая анализ данных спутниковых наблюдений и данных риометрического поглощения в южной полярной шапке, показало, что максимальный уровень турбулентности наблюдается в области 20–24 ч магнитного локального времени, где, как правило, локализован «глаз суббури» — область формирования авроральной выпуклости во время взрывной фазы суббури. Получен ряд доказательств справедливости разработанной ранее модели начала взрывной фазы магнитосферной суббури на квазидипольных магнитных силовых линиях и уярчения авроральной дуги во время начала взрывной фазы. Предложен механизм, объясняющий вытягивание магнитных силовых линий перед началом взрывной фазы суббури. Показано, что определяющим фактором уярчения ближайшей к экватору дуги полярного сияния во время магнитосферной суббури является формирование продольных пучков частиц на границе наиболее экваториальной структуры типа перевернутого V.

Проведено рассмотрение с единой точки зрения сложных динамических процессов в геомагнитном хвосте, включая циклы нагружения

и разгрузки электромагнитной энергии, быстрой потери равновесия, вложенные тонкие токовые слои (ТС), среднемасштабные турбулентные движения плазмы, интенсивные вариации магнитного поля. В качестве основных выделены нелинейные динамические процессы формирования тонких кинетических ТС.

Проведенные исследования с использованием численного моделирования методом частиц (рис. 1) показали, что спонтанно образующиеся нелинейные токовые структуры являются квазистационарными. Они могут принадлежать к двум различным типам в зависимости от условий в плазменном слое. При определенных условиях они представляют собой нелинейные равновесные ТС с анизотропными ионами. При других условиях они являются парой бесстолкновительных медленных волн. В обоих случаях имеет место быстрая трансформация электромагнитной энергии в энергию быстрых течений плазмы. Последнее, в свою очередь, может быть источником энергии двумерной МГД турбулентности в плазменном слое. В то время как спонтанно появляющиеся тонкие токовые структуры являются квазистационарными, включающее их возмущение при больших пространственных масштабах также включает быстрый МГД компонент. Последнее может привести к новому нарушению равновесия в некоторых новых зонах в плазменном слое. За этими нарушениями снова следуют релаксационные процессы, включающие формирование вложенных тонких ТС и быстрых потоков ионов. Образующаяся перемежаемость является характерной особенностью турбулентных возмущений в плазменном слое.

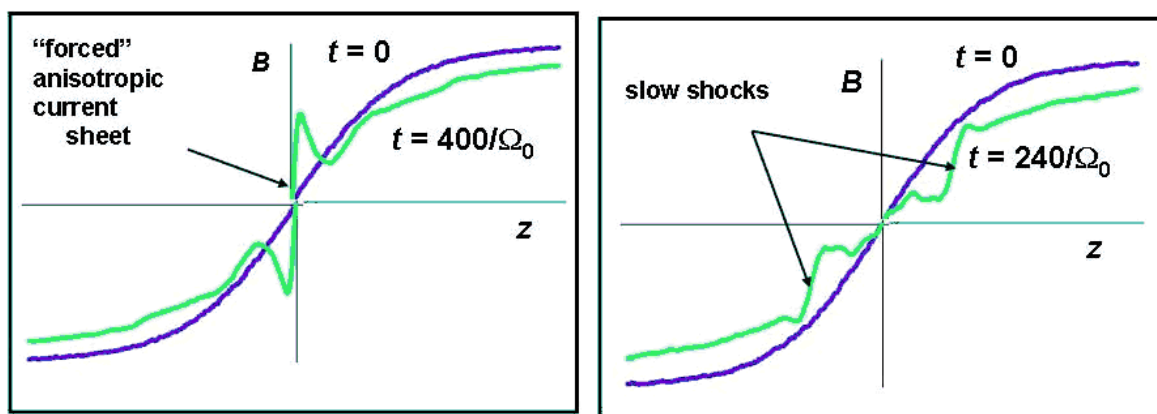


Рис. 18. Формирование тонкого вложенного токового слоя

Наблюдения, проведенные в плазменном слое, показывают широкий диапазон вложенных токовых структур. Выполнено детальное изучение в кинетической теории с использованием численного моделирования различных типов равновесных ТС. Показано, что присутствие ионов кислорода в геомагнитном хвосте по сравнению с водородной плазмой может объяснить толщины границ тонких ТС. Получены равновесные решения с парой пиков токовой плотности. В таких бифурцировавших токовых слоях

домен фазовой плотности квазизахваченных ионов увеличивается при ионной экспансии на транзиентные орбиты, являющиеся носителями тока. Это может вызвать затухание ТС. Была принята во внимание электронная компонента, и было показано, что в центре ТС образуется очень тонкий электронный пик. Созданная теория отражает иерархию плазменных структур и процессов в магнитосфере, где микро, мезо и макро масштабы близко взаимосвязаны.

Исследована топологическая структура магнитосферы при северном ММП в рамках параболоидной модели. Изучена для фиксированных условий в солнечном ветре положение области полярной шапки, разность потенциалов поперек полярной шапки, потенциалы продольного ускорения, зависящие от давления солнечного ветра и изменений V_y и V_x ММП. Определены границы открытых магнитных силовых линий, которые связывают полярную ионосферу Земли с межпланетным пространством. Показано, что специфическое вращение пучка магнитных силовых линий, имеющее место вблизи областей каспов приводит к вихревой конвективной особенности в полярной ионосфере. Показано, что движение магнитных нулевых точек внутри магнитосферы при северном ММП приводит к дополнительному ослаблению электрического поля солнечного ветра проникающего в магнитосферу.

Создана модель частично кольцевого тока. Она включает продольные токи и замыкающие токи восточного электроджета. Созданная модель частично кольцевого тока дает возможность вычислять магнитное поле на поверхности Земли. Относительные вклады кольцевого тока и хвостового тока в Dst вариацию исследованы на основе статистического изучения 70 магнитных бурь разной интенсивности. Специальное внимание уделялось аномально возмущенным условиям во время магнитных бурь октября – ноября 2003 г. Вычислены вариации магнитного поля вызываемые магнитосферными токами на поверхности Земли с использованием параболоидной модели магнитосферы A2000, принимая во внимание эффект индуцированных в Земле токов. Анализ Dst источников продемонстрировал насыщение хвостового тока при экстремально возмущенных условиях. Кольцевой ток становится доминирующим источником Dst во время больших магнитных бурь, но во время средних бурь его вклад в Dst сравним с вкладом хвостового тока. Амплитуда инжекции кольцевого тока увеличивается с увеличением уровня магнитосферной возмущенности. Эффект асимметричного кольцевого тока анализировался во время магнитной бури 20–22 ноября 2003 г. Было показано, что полный частичный кольцевой ток составляет 6 МА во время максимума бури. Его вклад в Dst на главной фазе бури порядка 70 нТ, в то время как вклад симметричного кольцевого тока составляет около 200 нТ. Частичный кольцевой ток быстро развивается и резко спадает до предбуревых уровня на временном масштабе порядка 10 часов.

Получены обобщенные спектры потоков протонов и электронов на $L < 1,2$ и потоков электронов на $1,2 < L < 1,9$ в магнитосфере Земли.

Показано, что для потоков электронов на $L < 2$ характерно наличие излома в спектре вблизи энергии ~ 1 МэВ.

Разработана компьютерная модель электризации космических аппаратов в горячей магнитосферной плазме, предназначенная для проведения инженерных расчетов на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации аппаратов. В модели предусмотрена возможность задания в интерактивном режиме условий функционирования аппарата, изменения его геометрии и электрофизических свойств конструкционных материалов.

1.2.6.4. Создание Интернет-портала, баз данных, издание «Моделей Космоса»

Создан информационный Интернет-портал <http://smdc.sinp.msu.ru>, который включают в себя базы данных измерений потоков заряженных частиц; средства визуализации данных и средства для анализа геомагнитного состояния магнитосферы и радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве. Базы данных в среде Oracle включают в себя результаты измерений потоков заряженных частиц на орбите спутника «Университетский-Татьяна», «Коронас-Ф» и «Метеор-3М», а также данные космических экспериментов, выполненных в 90-х годах прошлого столетия. Совместно с прикладными версиями моделей космической среды, разработанных в НИИЯФ МГУ, база данных космических экспериментов образует единую систему космического мониторинга для хранения, обработки, научного анализа и отображения космофизических данных.

Разработан информационный портал <http://smdc.magnetosphere.ru/>, который обеспечивает доступ к данным космических экспериментов НИИЯФ МГУ, а также — к моделям радиационной и геомагнитной обстановки в околоземном космическом пространстве Земли.

Создан интерактивный пакет программ (ИПП) COSRAD и WEB-интерфейс (<http://cosrad.sinp.msu.ru>), который предназначен для прогнозирования радиационных условий, поглощенной и эквивалентной дозы и частоты одиночных сбоев в микросхемах, которые ожидаются на борту космических аппаратов во время их долговременного полета (более 1 года). Все расчеты проводятся с учетом предполагаемой толщины защиты на космических аппаратах для потоков: электронов и протонов радиационных поясов Земли, протонов и ядер химических элементов (от гелия до урана) галактических космических лучей, протонов и ионов (от гелия до никеля) солнечных космических лучей.

На основании обобщения результатов исследований НИИЯФ МГУ в области исследований Космоса и космического материаловедения, выполненных за последние 20 лет, и проведенного анализа важнейших достижений российских и зарубежных ученых в данной области подготовлена и издана монография «Модель Космоса». Двухтомное издание предназначено для работников космической отрасли, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

2.1.7. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РАН

2.1.7.1. Доказательство существования многозарядных ионов АРГОНА АКЛ

Измерен спектр ионов аргона АКЛ в интервале энергий 14–42 МэВ/нуклон в эксперименте ПЛАТАН-5 на станции «Мир» в 1994–1997 гг. Спектр проанализирован совместно с данными, полученными прибором SIS на станции ACE в околоземном пространстве. В результате сравнения спектров внутри и вне магнитосферы проведена оценка среднего эффективного заряда ионов аргона АКЛ, который оказывается существенно больше единицы при энергиях, превышающих 22 МэВ/нуклон. Заряд ионов постепенно увеличивается с ростом энергии и достигает значения $Q = 4$ при энергии 38 МэВ/нуклон.

Введение

Аномальные космические лучи (АКЛ), прежде всего «классические» ионы He, O, Ne и Ar с высоким первым потенциалом ионизации $\geq 13,5$ эВ, являются весьма информативным объектом исследования. Они несут в себе многообразную информацию о процессах ускорения и распространения частиц в гелиосфере. Предполагается, что основное ускорение происходит на конечной ударной волне на границе гелиосферы. Однако имеющихся экспериментальных данных пока недостаточно, для того чтобы обосновать относительно полную теоретическую модель явления АКЛ. Несмотря на многочисленные теоретические исследования и предположения при построении моделей их авторы встречаются с рядом трудностей. Предположение об ускорении ионов на пограничной ударной волне пока не получило экспериментального подтверждения. Аппарат Voyager-1 зафиксировал прохождение границы гелиосферы в декабре 2004 г. на расстоянии 94 а.е. Однако в месте прохождения границы гелиосферы на гелиошироте 34° N не наблюдалось ожидаемого увеличения энергии и интенсивности ионов АКЛ за исключением обычной модуляции, обусловленной уменьшением факторов солнечной активности (СА) при переходе от максимума к минимуму СА. Аналогичная модуляция была зарегистрирована и аппаратом Voyager-2, который находился в 2004 г. внутри гелиосферы.

Ионы Ar АКЛ являются наименее исследованными вследствие их малой распространенности. При энергиях 10 – 20 МэВ/нуклон интенсивность ионов Ar в несколько сот раз меньше, чем ионов O. Важно выяснить насколько различия ионов O и Ar по массе и жесткости, могут сказаться на характеристиках транспорта ионов в гелиосфере и ускорении на ее границе. Захваченные и межпланетные ионы аргона с энергией 1–4 МэВ/нуклон были зарегистрированы прибором MAST на аппарате Samrex. При этом отношение чисел захваченных к числу межпланетных оказалось порядка 200,

что в два раза выше по сравнению с аномальными ионами кислорода. Захваченные ионы аргона при энергии >16 МэВ/нуклон в эксперименте не были зарегистрированы. Вне магнитосферы спектр межпланетных ионов аргона АКЛ в интервале 3,5–20 МэВ/нуклон был измерен на аппарате Wind и в интервале 10–40 МэВ/нуклон прибором SIS на станции ACE на расстоянии $1,5 \cdot 10^6$ км от Земли. При энергии больше 40 МэВ/нуклон в спектре наблюдается провал с последующим возрастанием потока, обусловленного вкладом ядер аргона ГКЛ.

Важной информацией являются данные о многозарядной компоненте ионов АКЛ при энергии >20 МэВ/нуклон. Впервые ионы О АКЛ с зарядом $Q > 1$ были зарегистрированы приборами MAST и HILT на аппарате Samrex. Было сделано также предположение о существовании многозарядной компоненты и у других ионов АКЛ.

Целью настоящей работы является измерение энергетического спектра аргона АКЛ внутри магнитосферы Земли и определение степени ионизации аномального аргона путем сравнения со спектром вне магнитосферы при использовании функций пропускания ионов для орбиты станции Мир (рис. 1).

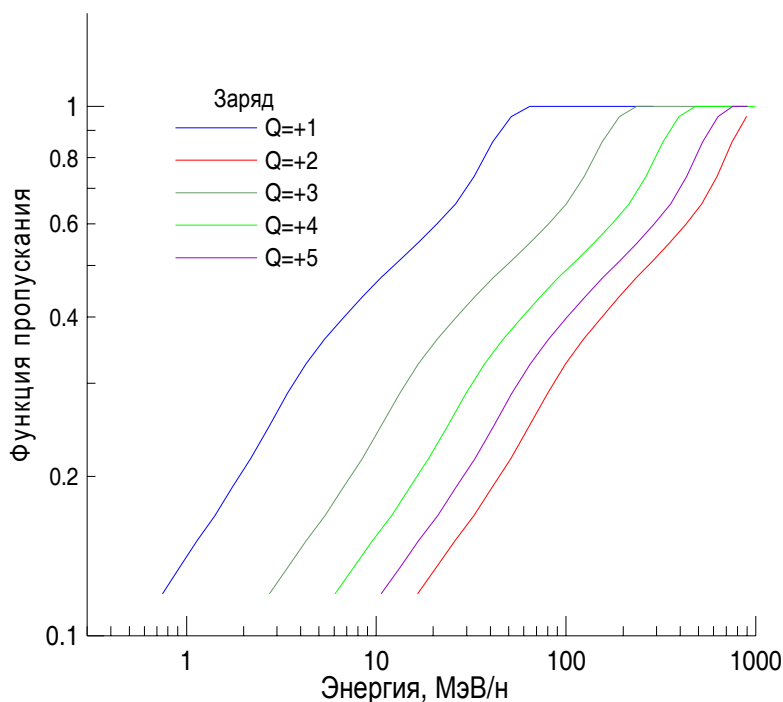


Рис. 1. Проникновение заряженных частиц на орбиту станции Мир: функция пропускания ионов аргона с разными зарядами

Методика

Камера ПЛАТАН-5 (ПЛАстиковый Трековый АНАлизатор) была экспонирована на наружной поверхности модуля «Квант-2» станции «Мир» на орбите с наклоном $51,6^\circ$ и высотой 350–400 км с 11 сентября 1994 г. по 1 ноября 1997 г. Камера с геометрическим фактором $5200 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ состояла из 32 слоев твердотельного трекового детектора толщиной 180 мкм лавсана —

полиэтилентерефталата. Слои детектора подвергались принятой нами технологической обработке. Измерения выполнены в одном из 8 идентичных блоков, составляющих камеру ПЛАТАН-5, для треков, останавливающихся во втором–шестом слоях от верха камеры. Идентификация заряда ядер проведена методом LR-диаграмм.

На рис. 2а представлено зарядовое распределение ядер, остановившихся во втором и третьем слоях в камере ПЛАТАН-5. В нем проявляются пики ионов неона АКЛ и ионов аргона АКЛ. Пик аргона сравним по амплитуде с пиком ядер железа ГКЛ. Для сравнения на рис. 2б показан спектр ядер ГКЛ, измеренный по всей глубине камеры ПЛАТАН-4, экспонированной в течение 10 мес на станции Мир с 11 сентября 1994 г. по 23 июля 1995 г. В последнем распределении вклад аномального аргона пренебрежимо мал (не более 4–5 частиц), что определяется меньшей длительностью экспозиции и меньшей просмотренной площадью детектора в камере ПЛАТАН-4. Это подтверждается прямыми измерениями в верхних слоях камеры ПЛАТАН-4. Зарядовые спектры на рис. 2а, б не отражают полностью относительную распространенность отдельных элементов, так как в них не учтены геометрические поправки, увеличивающиеся с уменьшением заряда частиц. Однако они свидетельствуют о достаточном зарядовом разрешении, позволяющем выделить аномальную компоненту ионов аргона и неона.

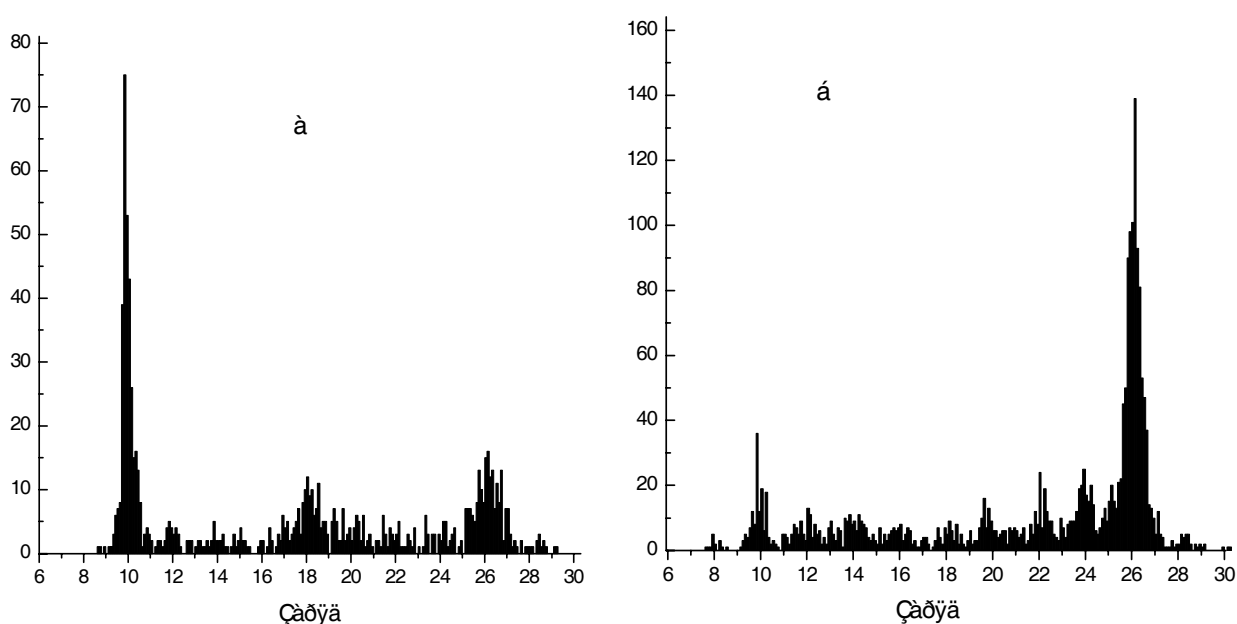


Рис. 2. Зарядовое распределение частиц в камерах: а — ПЛАТАН-5; б — ПЛАТАН-4

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены следующие данные:

а) спектр ионов Ar АКЛ в интервале энергий 3–20 МэВ/нуклон в межпланетном пространстве, измеренный прибором LEMT в эксперименте ЕРАСТ на аппарате Wind в спокойные дни с ноября 1994 г. по ноябрь 1998 г.;

б) суммарный спектр Ar АКЛ и Ar ГКЛ, измеренный в межпланетном пространстве прибором SIS на станции ACE с сентября 1997 г. по март 1998 г. интервале энергий 10–120 МэВ/нуклон.

в) спектр Ar АКЛ, измеренный внутри магнитосферы на станции «Мир» (данная работа) в интервале энергий 14–42 МэВ/нуклон.

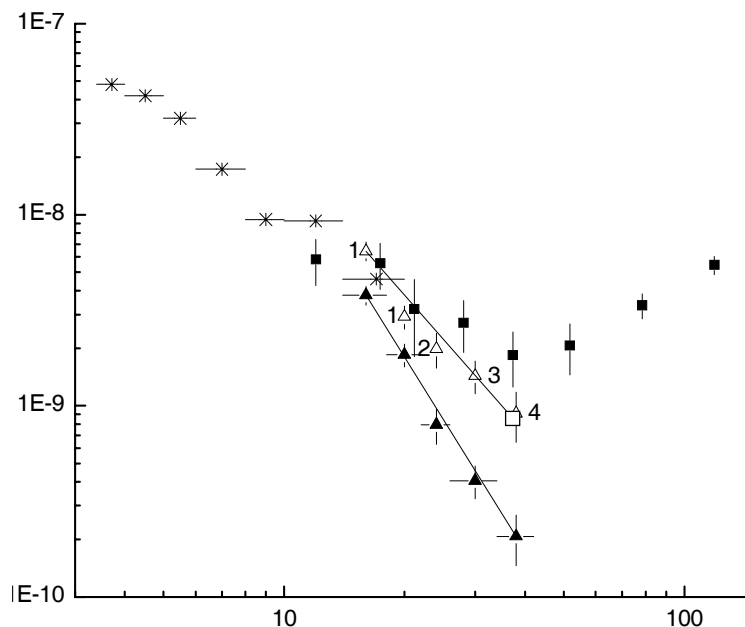


Рис. 3. Энергетические спектры ионов Ar, измеренные в минимуме солнечной активности вне магнитосферы Земли на аппаратах Wind: * — LEMT; ACE ■ — SIS и внутри магнитосферы Земли на орбите станции Мир ▲ — ПЛАТАН-5; Δ — пересчет интенсивности ионов Ar АКЛ с орбиты станции Мир на орбиту Земли при указанных значениях среднего эффективного заряда; ▽ — интенсивность ионов Ar АКЛ (ACE) после вычитания вклада Ar ГКЛ; прямые — спектры Ar АКЛ внутри и вне магнитосферы Земли

Отметим, что статистические ошибки при измерении внутри магнитосферы в 2–3 раза меньше чем при измерении прибором SIS на ACE. Мы полагаем, что спектр внутри магнитосферы имеет степенной вид (заполненные треугольники на рис. 3). При энергии 37 МэВ/нуклон мы оценили вклад ионов Ar АКЛ (не заполненный квадрат на рис. 3). Для этого из спектра Ar вне магнитосферы был вычтен вклад галактического Ar и полученное значение увеличено на 16 % с учетом того, что измерения на ACE проводились уже на спаде интенсивности АКЛ по аналогии с данными по интенсивности ионов кислорода АКЛ. Далее мы оценили значение интенсивности аномального аргона вне магнитосферы при энергии 16 МэВ/нуклон, используя функции пропускания для ионов аргона с различной степенью ионизации (в данном случае для $Q = 1$). Полученное значение (незаполненный треугольник на рис. 3) хорошо согласуется с результатами измерений на аппаратах Wind и ACE. Аппроксимация энергетического спектра ионов Ar АКЛ степенной функцией с показателем $\gamma \approx 2,4$ согласуется с подобным видом спектра ионов кислорода АКЛ ($\gamma = 2,12\text{--}2,62$) в интервале энергий 15–50 МэВ/нуклон. В результате мы получаем оценку формы

спектра ионов аргона АКЛ в межпланетном пространстве. При переходе от спектра внутри магнитосферы к спектру вне магнитосферы проявляется постепенное увеличение среднего эффективного заряда ионов Ar с ростом энергии: $Q > 1$ (20 МэВ/нуклон); $Q > 2$ (24 МэВ/нуклон); $Q = 3$ (30 МэВ/нуклон); $Q = 4$ (38 МэВ/нуклон). Отметим, что для ионов O и Ne АКЛ увеличение среднего эффективного заряда в диапазоне энергий 15–25 МэВ/нуклон более слабое (от $Q = 1$ до $Q = 2$). Отметим также, что определение степени ионизации аргона АКЛ невозможно на аппаратах последнего поколения, функционирующих в настоящее время.

Следует обратить внимание на две характеристики, связанные с изменением радиального градиента интенсивности АКЛ.

Во-первых, радиальный градиент для ионов Ar АКЛ, полученный по измерениям на аппаратах Voyager-1, Voyager-2 и Pioneer и на аппарате SIS уменьшается примерно вдвое от 3,3–4 до ~2 с увеличением энергии от 10 до 20 МэВ/нуклон.

Во-вторых, радиальный градиент для ионов Ar АКЛ, указанный выше, значительно меньше, чем для ионов O АКЛ (~6,5) при энергии 7–17 МэВ/нуклон.

Отмеченные особенности могут быть отражением увеличения степени ионизации АКЛ с энергией и различия в жесткости для ионов O и Ar АКЛ.

Заключение

1. Впервые внутри магнитосферы Земли измерен энергетический спектр ионов Ar АКЛ в энергетическом интервале 14–42 МэВ/нуклон.

2. Получена оценка формы спектра ионов аргона АКЛ в межпланетном пространстве в указанном диапазоне энергий.

3. Установлено, что с увеличением массы и энергии эффективный средний заряд ионов АКЛ возрастает. Для ионов Ar заряд достигает значения $Q = 4$ при энергии 38 МэВ/нуклон.

2.1.8. МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ). ИНСТИТУТ АСТРОФИЗИКИ

2.1.8.1. Результаты обработки данных с аппаратуры АВС-Ф в эксперименте КОРОНАС-Ф

Аппаратура АВС-Ф (Амплитудно-Временная спектрометрия Солнца) предназначена для изучения характеристик потоков жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек, а также поиска и регистрации событий типа гамма-всплеск [1, 2]. Эксперимент проводился в рамках международной программы КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активного Солнца) на специализированной автоматической станции «КОРОНАС-Ф» в период с 31 июля 2001 г. по 6 декабря 2005 г. Аппаратура АВС-Ф представляла собой систему электроники для бортовой обработки информации с двух детекторов: СОНГ-Д [3] (детектор на основе CsI(Tl) Ø200 мм и высотой 100 мм, окруженный пластиковой антисовпадательной защитой) в низкоэнергетическом и в высокоэнергетическом гамма-диапазонах с энергетическими окнами 0,1–10 и 2–80 МэВ соответственно, и РПС-1 [4, 5] (детектор на основе CdTe размерами 4,9×4,9 мм) в рентгеновском диапазоне с энергией от 3 до 30 кэВ. Диапазоны работы аппаратуры АВС-Ф менялись в течение времени работы прибора: пороговая энергия увеличивалась на ~1 % в месяц, коэффициент преобразования изменялся на ~1,8 % в месяц [6, 7]. Энергетическое разрешение аппаратуры составляло 13 % (86 кэВ на линии 662 кэВ) [7]. Функциональная схема аппаратуры АВС-Ф приведена на рис. 1.

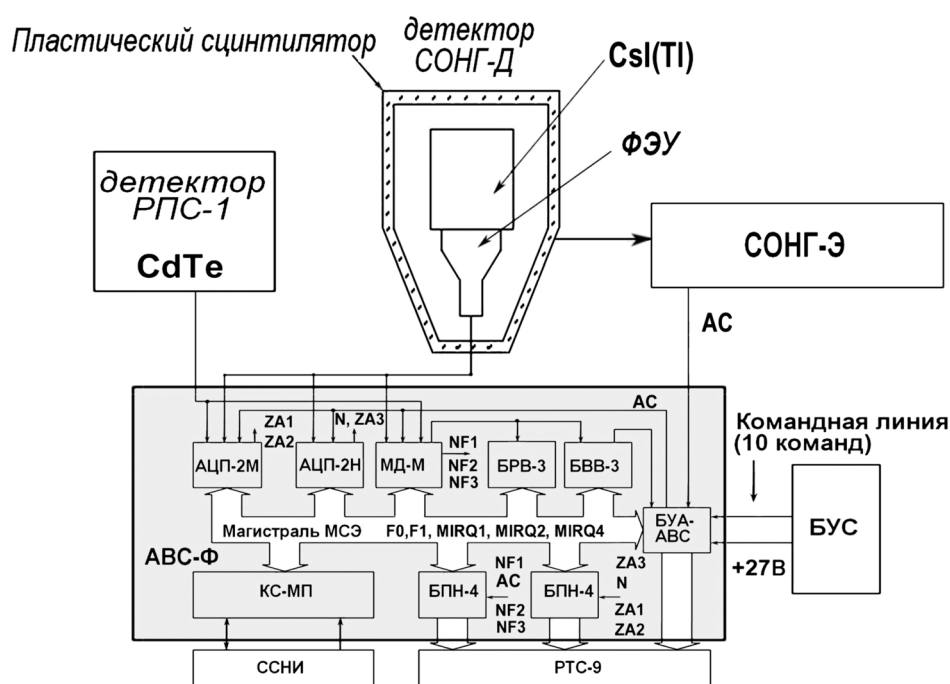


Рис. 1. Функциональная схема аппаратуры АВС-Ф

Характеристики солнечных вспышек по данным аппаратуры АВС-Ф

Более 100 солнечных вспышек было выделено в процессе обработки данных. Составлены каталоги солнечных вспышек, зарегистрированных в низкоэнергетическом [8-10] и в высокоэнергетическом [11] диапазонах работы аппаратуры АВС-Ф (в настоящее время обработано ~40 % сеансов наблюдения).

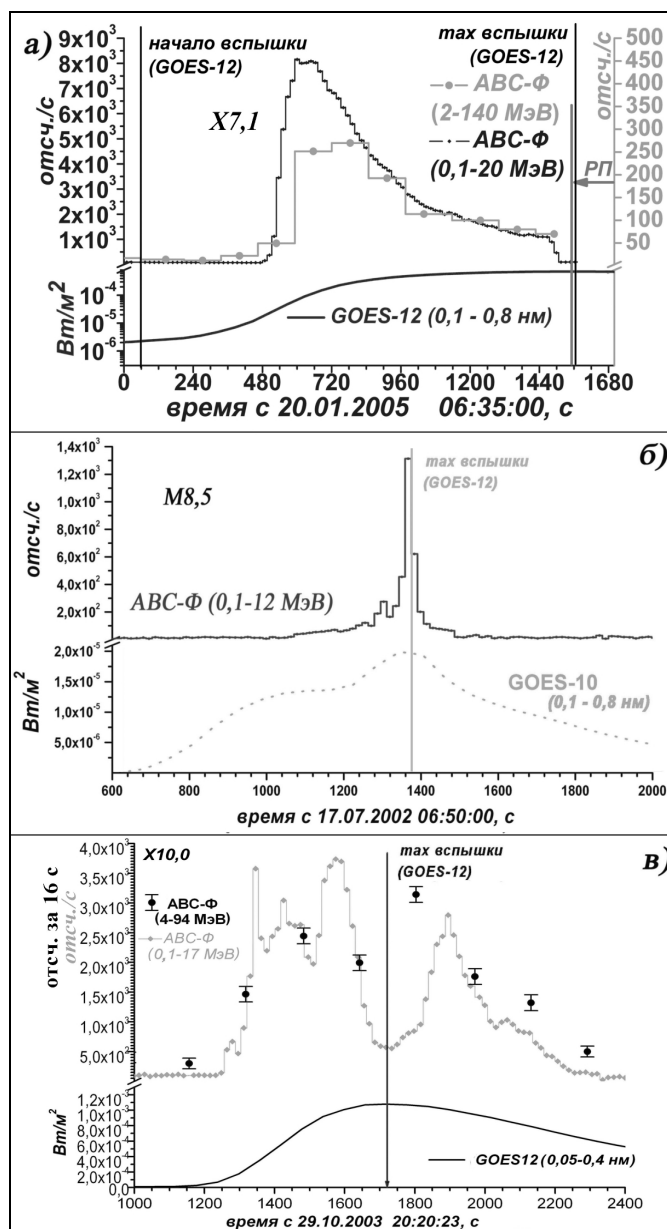


Рис. 2. Примеры временных профилей солнечных вспышек, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф

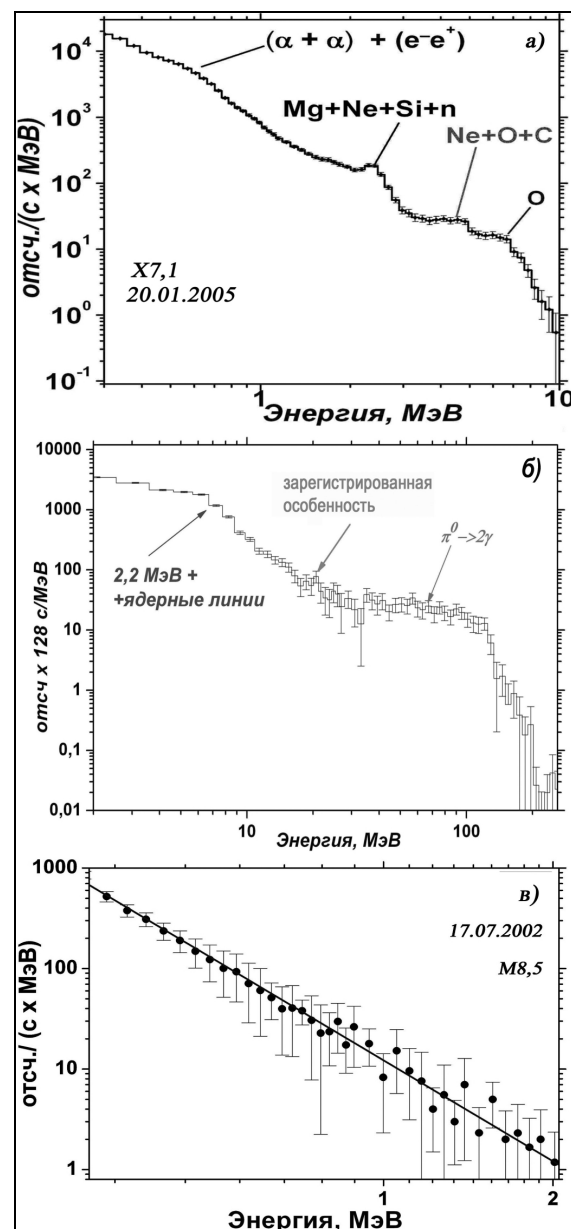


Рис. 3. Энергетические спектры солнечных вспышек по данным аппаратуры АВС-Ф

Примеры временных профилей солнечных вспышек, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф, приведены на рис. 2. В большей части вспышек жесткое рентгеновское и γ -излучение наблюдалось во время нарастания или максимума мягкого рентгеновского излучения,

зарегистрированного приборами, установленными на спутниках серии GOES и длительность его регистрации меньше, чем мягкого рентгеновского излучения (см. рис. 2а и б) [8, 9, 12–15]. В некоторых солнечных вспышках длительность жесткого рентгеновского и γ -излучения почти совпадает с длительностью мягкого рентгеновского излучения (см. рис. 2в [8, 16–18]. Гамма-излучение с энергией больше ~ 17 МэВ наблюдалось в 10 % зарегистрированных вспышек по результатам предварительного анализа данных [12, 19]. В 8 вспышках длительности регистрации γ -излучения в обоих диапазонах работы аппаратуры АВС-Ф практически совпадают [11, 15–17].

В спектрах некоторых солнечных вспышек в низкоэнергетическом диапазоне аппаратуры АВС-Ф наблюдались комплексы спектральных γ -линий, соответствующие $\alpha\alpha$ -линии, аннигиляционной линии, ядерным линиям вплоть до линии 7,62 МэВ (^{57}Fe), линии от захвата нейтронов ($\sim 2,223$ МэВ) (рис. 3а и 5а [9, 12, 16, 17], а в высокоэнергетическом диапазоне — особенность в интервале ~ 2 –7 МэВ (соответствующая комбинации зарегистрированных в низкоэнергетическом диапазоне ядерных линий с энергиями $E > 2$ МэВ и линии от захвата нейтронов), а также особенность, соответствующая регистрации γ -квантов от распадов нейтральных пионов (см. рис. 3б) [17, 22, 23].

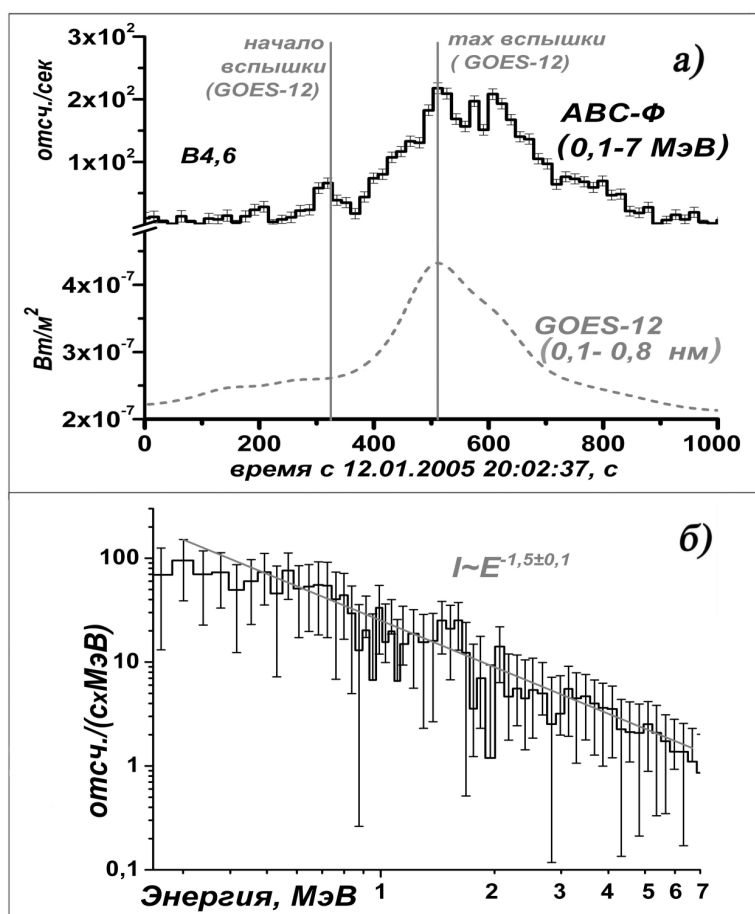


Рис. 4. Временной профиль (а) и спектр (б) слабой солнечной вспышки 12 января 2005 года

В спектре вспышки 20.01.2005 была впервые зарегистрирована не идентифицированная на данный момент особенность в диапазоне 15–21 МэВ. Эта особенность наблюдалась в интервале времени 06:44:52–06:51:16 UT [19]. В суммарном спектре вспышки за этот интервал времени она выделяется на уровне $2,5\sigma$ (см. рис. 3б), а в максимуме жесткого гамма-излучения (06:47:00–06:49:08 UT) — на уровне 3σ [18, 19]. Эта особенность может быть связана с линией 15.11 МэВ ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$) или линией 20.58 МэВ от радиационного захвата нейтронов на ^3He , либо быть их комбинацией [18, 19].

Так же было зарегистрировано несколько вспышек, в спектрах которых линии отсутствуют (электронно-доминантных) (см. рис. 3в и 4б) [8, 14, 20, 21].

Наличие или отсутствие высокоэнергетического γ -излучения во время солнечной вспышки не имеет строгой корреляции с интенсивностью ее излучения в мягком рентгеновском диапазоне. Так, для некоторых вспышек класса М не было зарегистрировано статистически значимого превышения скорости счета над фоном в диапазоне $E > 50$ кэВ по данным аппаратуры АВС-Ф, например, во время вспышки 08.11.2001 класса М4.2 (начало в ~14:59 UT, максимум в ~15:35 UT, окончание в ~16:00 UT по данным приборов, установленных на спутниках серии GOES). Тем не менее, в некоторых случаях наблюдалось излучение в низкоэнергетическом гамма-диапазоне во время очень слабых солнечных вспышек (классов В и С) [20, 21].

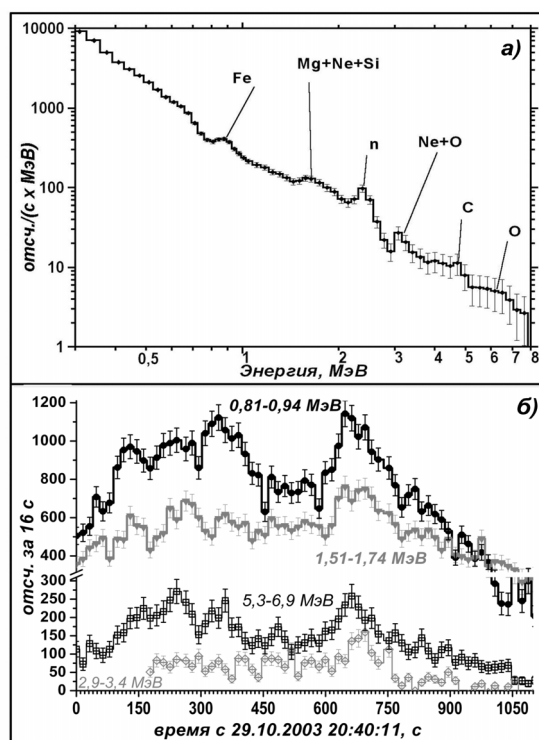


Рис. 5. Энергетический спектр солнечной вспышки 29.10.2003 в низкоэнергетическом диапазоне по данным аппаратуры АВС-Ф (а) и временные профили этой вспышки в некоторых соответствующих выделенным спектральным особенностям энергетических диапазонов (б)

В качестве примера подобных событий представлена вспышка класса В4.6 12.01.05 (см. рис. 4) [20, 21]. Максимальная энергия гамма-излучения, зарегистрированного во время этой вспышки, составила $E_{\max} = 7,0 \pm 0,3$ МэВ, но линии в спектре этой вспышки отсутствуют. На временном профиле этой вспышки (по результатам предварительного анализа периодограмм) присутствует тонкая структура с характерным масштабом ~ 90 с [20]. В настоящий момент проводится составление каталога таких слабых вспышек.

Во время некоторых событий (в том числе и слабых вспышек) при анализе периодограмм временных профилей была выделена тонкая структура с масштабами порядка 30–160 с в низкоэнергетическом диапазоне аппаратуры АВС-Ф и с теми же характерными масштабами – в энергетических диапазонах, соответствующих выделенным в спектрах этих вспышек линиям [15,22,23] (см. рис. 5б). Уровень значимости выделенных регулярностей временных рядов составляет 99 % [13,21]. Во время некоторых вспышек временные профили в различных диапазонах настолько смещены, что суммарный временной профиль в низкоэнергетическом диапазоне аппаратуры АВС-Ф не имеет тонкой структуры [22].

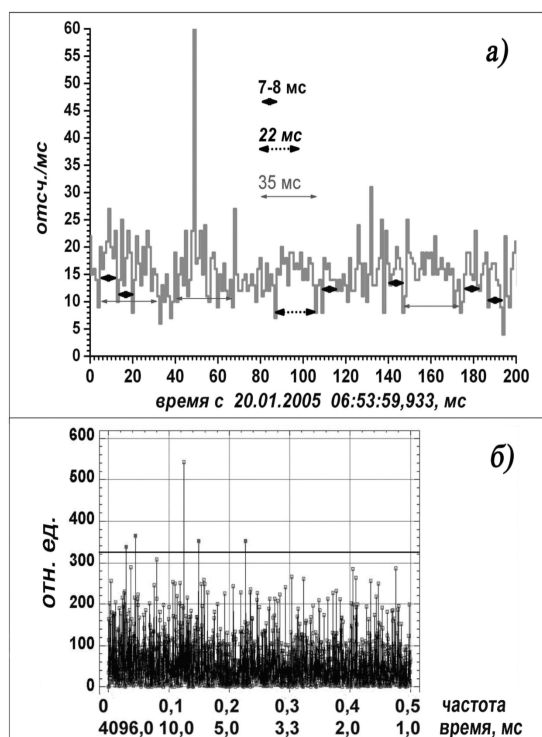


Рис. 6. Тонкая структура (а) и периодограмма (б) временного ряда с разрешением 1 мс для вспышки 20 января 2005 года в энергетическом диапазоне 0,1–20 МэВ

По результатам предварительного анализа фрагментов временных профилей с временным разрешением 1 мс длительностью 4,096 с для семи солнечных вспышек (анализировалось от 1 до 6 фрагментов для каждой вспышки) только для вспышки 20 января 2005 г. в энергетическом диапазоне 0,1–20 МэВ обнаружено наличие тонкой структуры временного ряда с масштабом от 7 мс до 35 мс с доверительной вероятностью 99 % (рис. 6) [23].

Свойства гамма-всплесков по данным аппаратуры ABC-Ф

За период работы ABC-Ф было зарегистрировано более 30 гамма-всплесков (Gamma-ray bursts – GRB) в низкоэнергетическом гамма-диапазоне [24, 25]. Все зарегистрированные гамма-всплески имели длительность более 2 с, так как минимальное время накопления спектральной информации с детекторов аппаратуры ABC-Ф составляет 1 с. Сравнительные характеристики аппаратуры ABC-Ф и других детекторов GRB приведены в табл. 1 [24].

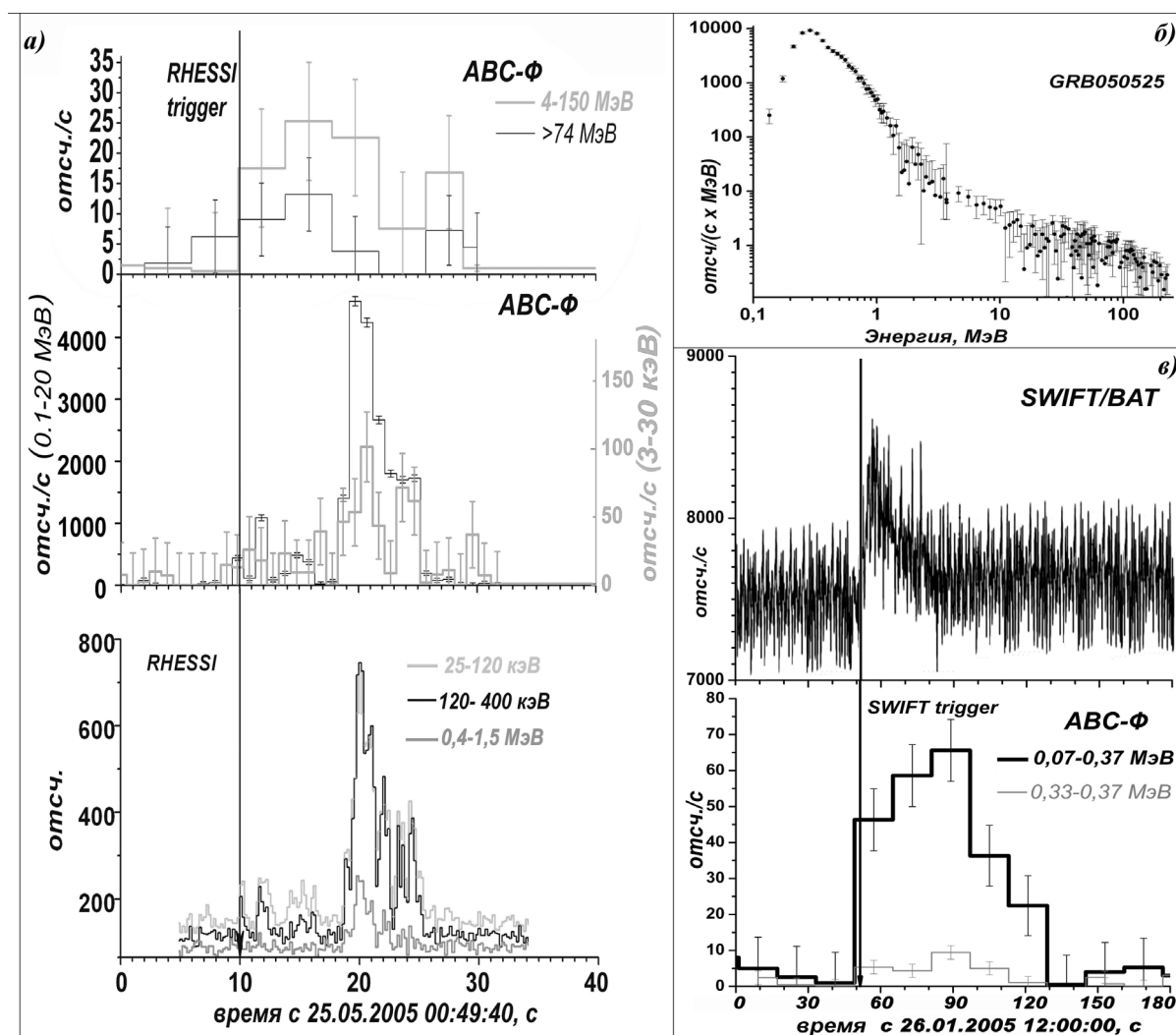


Рис. 7. Временной профиль GRB050525 по данным ABC-Ф и RHESSI (а) и его энергетический спектр по данным ABC-Ф (б), а так же временной профиль GRB050126 по данным ABC-Ф и SWIFT (в)

Большая часть зарегистрированных в низкоэнергетическом диапазоне аппаратуры ABC-Ф GRB подтверждена данными HETE, RHESSI и SWIFT/BAT (рис. 7а, в), а во время некоторых всплесков наблюдалось высокоэнергетическое гамма-излучение: $E_{\max} = 147 \pm 3$ МэВ для GRB050525 – (рис. 7б) [25]. Излучение таких высоких энергий не регистрировалось другими приборами в данный период.

Таблица 1. Сравнительные характеристики аппаратуры ABC-Ф и других детекторов GRB

<i>Характеристики</i>	<i>Детекторы</i>			
	<i>ABC-Ф</i> (гамма-диапазоны)	<i>RHESSI</i>	<i>Swift/BAT</i>	<i>GGG Wind/Konus</i>
Эффективная площадь	~600 см ²	~300 см ²	5200 см ²	200 см ²
Поле зрения	~2π ср	2π ср	2 ср	4π ср
Детектор	CsI(Tl)	Ge	CdZnTe	NaI
Энергетический диапазон	0,05–11 МэВ 4–94 МэВ (данные 2001 г.) 0,08–22 МэВ 2–260 МэВ (данные 2005 г.)	0,05–17 МэВ	15–150 кэВ	0,01–10 МэВ
Энергетическое разрешение (FWHM)	86 кэВ (13 %) на 662 кэВ	<3 кэВ на 100 кэВ <5 кэВ на 500 кэВ	3,3 кэВ на 60 кэВ 100 кэВ на 660 кэВ	100 кэВ на 660 кэВ

Изучение квазистационарных экваториальных высыпаний по данным аппаратуры ABC-Ф

Изучение магнитосферных явлений было одной из задач исследования компонент фонового жесткого рентгеновского и гамма излучения на орбите с высотой ~500 км и наклоном ~82,5° по данным аппаратуры ABC-Ф.

На некоторых экваториальных участках было обнаружено увеличение скорости счета в низкоэнергетическом гамма-диапазоне аппаратуры ABC-Ф в интервале географической широты –25...+30° на 15–30 % относительно ее среднего значения, которое было получено при аппроксимации полиномами этих участков [7, 26]. Это явление было названо квазистационарные экваториальные высыпания. Как высыпания было идентифицировано более 700 (68 %) выделенных всплесковых событий при обработке ~40 % телеметрических сеансов.

Выделено четыре основных типа квазистационарных высыпаний [27–30] (рис. 8). Для высыпаний, временные (широтные) профили которых содержат резкое нарастание скорости счета к северу и пологий ее спад к югу от геомагнитного экватора (21 % зарегистрированных высыпаний — II тип) обнаружена линейная зависимость количества зарегистрированных высыпаний от уровня геомагнитной активности на 95 % уровне значимости [28, 30]. Для квазистационарных высыпаний, которые (около 44 % — I тип) имеют временные (широтные) профили с резким нарастанием скорости счета к югу от геомагнитного экватора и пологим ее спадом к северу имеется аналогичная тенденция [28, 29], а объем выборок событий III типа (~4 %, временные (широтные) профили симметричны и имеют резкие границы) и IV типа (также ~4 %, временные (широтные) профили симметричны и имеют ярко выраженный максимум) пока не достаточен для статистического

анализа. Типичные энергетические спектры квазистационарных экваториальных высыпаний имеют степенной вид $I \sim E^{-\alpha}$ [29, 30], где

$\alpha = 2,1 \pm 0,2$ для высыпаний I и III типов,

$\alpha = 1,8 \pm 0,1$ для высыпаний II типа.

Изучение поведения спектров других высыпаний еще не завершено.

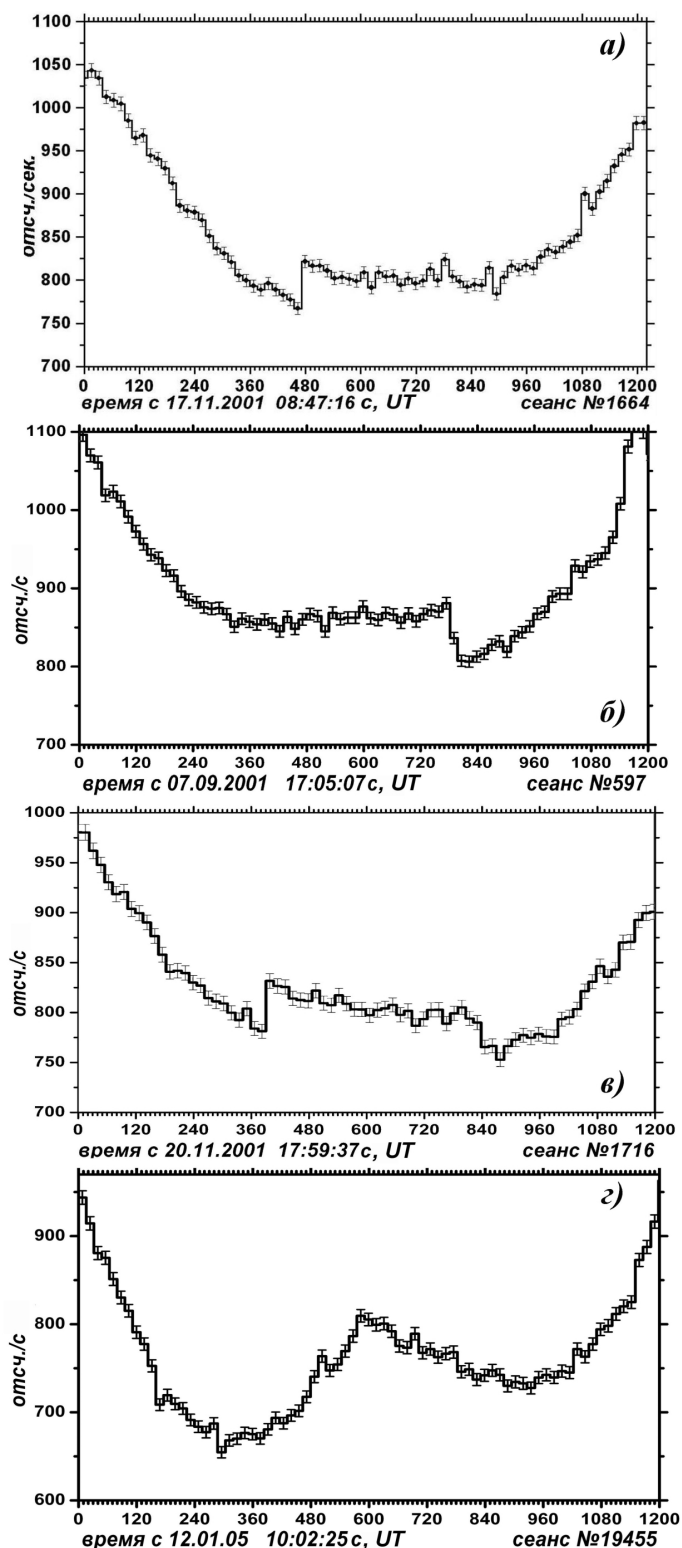


Рис. 8. Типичные временные (широтные) профили высыпаний по данным аппаратуры АВС-Ф: а — I типа; б — II типа; в — III типа; г — IV типа

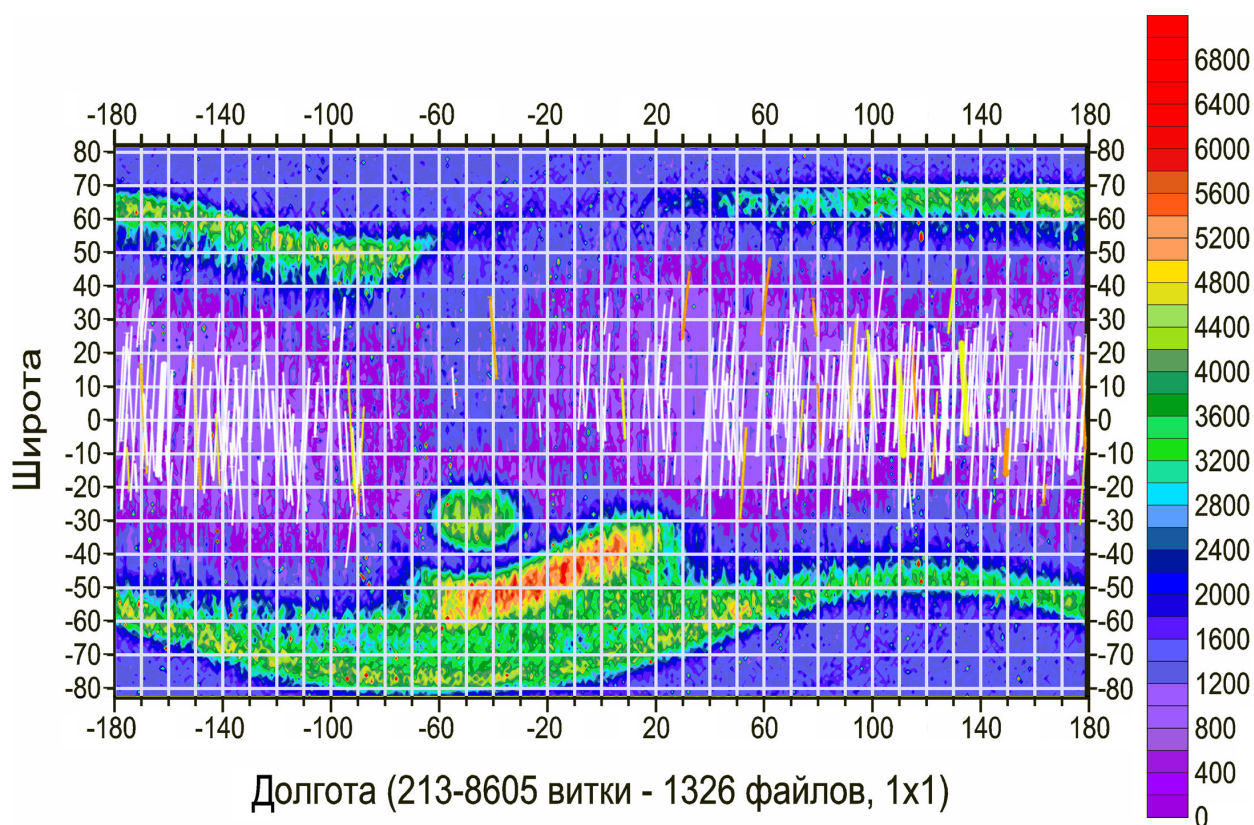


Рис. 9. Карта скорости счета в низкоэнергетическом диапазоне аппаратуры АВС-Ф, усредненная за 1,5 года работы. Линиями указаны 241 квазистационарное экваториальное высыпание (белые — I тип, оранжевые — II, желтые — III)

Большая часть высыпаний I–III типов расположена практически симметричной относительно геомагнитного экватора полосой шириной около 40° (рис. 9), ширина приэкваториальной области, в которой наблюдались высыпания IV типа $\sim 20^\circ$ [30]. Таким образом, основная часть высыпаний находится в областях, в которых регистрировались низкоширотные ($L \sim 1,5$) и экваториальные высыпания электронов [28, 30]. Квазистационарные экваториальные высыпания могут быть связаны с высыпаниями заряженных частиц в определенных областях магнитосферы Земли, которые космический аппарат КОРОНАС-Ф периодически пересекал.

Литература

1. Архангельский А.И., Гляненко А.С., Котов Ю.Д., Павлов А.В. и др. Эксперимент АВС-Ф по регистрации быстропеременных потоков космического и солнечного гамма-излучения в проекте КОРОНАС-Ф // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 5. С. 16.
2. Архангельский А.И., Гляненко А.С. Применение модуля MicroPC в аппаратуре АВС-Ф на борту спутника КОРОНАС-Ф // СТА. 2004. № 3. С. 30.
3. Гляненко А.С., Ковалень В.Ю., Котов Ю.Д., Панков В.М. и др. Рентгеновский полупроводниковый (CdTe) спектрометр для исследования излучения

- солнечных вспышек и их предвестников // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 34. № 11-12. С. 1500.
4. Панков В.М., Прохин В.Л., Хавенсон Н.С. Рентгеновский CdTe-спектрометр РПС-1 в эксперименте КОРОНАС-Ф // Астрономич. вестник. 2006. Т. 40. № 4. С. 344.
 5. Кузнецов С.Н., Богомолов А.В., Гордеев Ю.П., Гоцелюк Ю.В. и др. Предварительные результаты эксперимента, проводимого с помощью комплекса аппаратуры СКЛ на ИСЗ КОРОНАС-И // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59. № 4. С. 2.
 6. Архангельская И.В., Червякова О.И., Архангельский А.И., Гляненько А.С., Котов Ю.Д. Изучение стабильности работы спектрометрического тракта прибора АВС-Ф в низкоэнергетическом гамма-диапазоне // Сб. тезисов Международ. конф. «КОРОНАС-Ф: три года наблюдений активности Солнца, 2001–2004 гг.» 31 января – 5 февраля 2005 г. ИЗМИРАН. Троицк, 2005. С. 33.
 7. Архангельская И.В., Архангельский А.И., Гляненько А.С., Котов Ю.Д. Полетная калибровка и результаты обработки данных с аппаратуры АВС-Ф, полученных в ходе проведения эксперимента на космическом аппарате КОРОНАС-Ф // Космич. наука и технология. 2003. Т. 9. № 2. С. 20. Украина.
 8. Архангельская И.В., Архангельский А.И., Котов Ю.Д., Кузнецов С.Н. и др. Каталог солнечных вспышек в низкоэнергетическом гамма-диапазоне по данным аппаратуры АВС-Ф на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф за 2001–2005 гг. // Астрономич. вестник. 2006. Т. 40. № 2. С. 150.
 9. Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skii A.I., Glyanenko A.S., Kotov Yu.D. et al. The solar flares observed in low energy gamma-ray band by AVS-F apparatus data onboard CORONAS-F satellite in 2001–2005 years // Proc. 11th European Solar Physics Meeting “The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations” (ESA SP-600). 11–16 September 2005, Leuven, Belgium / Eds. D. Danesy, S. Poedts, A. De Groof, J. Andries. 2005. P. 108.1.
 10. Arkhangel'sky A.I., Arkhangel'skaja I.V., Kotov Yu.D., Glyanenko A.S. et al. Solar flares observed by AVS-F instrument onboard CORONAS-F satellite during 2,5 year of it's operation // Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. IAU Symposium. V. 223. Cambridge, UK. Cambridge University Press, 2004. P. 441.
 11. Архангельская И.В., Архангельский А.И., Котов Ю.Д., Гляненько А.С. и др. Каталог солнечных вспышек по данным аппаратуры АВС-Ф на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф в высокоэнергетическом гамма-диапазоне 2001–2005 гг. // Тр. Всерос. конф. «Экспериментальные и теоретич. исслед. основ прогнозирования гелиогеофизической активности» / Под ред. В.Н. Обридко, В.В. Зайцев. Троицк, 2006. С. 9–14.
 12. Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skii A.I., Glyanenko A.S., Kotov Yu.D. et al. The investigation of January 2005 solar flares gamma-emission by AVS-F apparatus data onboard CORONAS-F satellite in 0.1–20 MeV energy band // Proc. 11th European Solar Physics Meeting “The Dynamic Sun: Challenges

- for Theory and Observations”, (ESA SP-600). 11–16 September 2005, Leuven, Belgium / Eds. D. Danesy, S. Poedts, A. De Groof, J. Andries. 2005. P. 107.1.
13. *Архангельская И.В., Архангельский А.И., Котов Ю.Д., Кузнецов С.Н. и др.* Гамма-излучение солнечных вспышек января 2005 г. по данным аппаратуры АВС-Ф на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф // *Астрономич. вестник*. 2008. № 4 (в печати).
 14. *Yermolaev Yu.I., Zelenyi L.M., Kuznetsov V.D., Chertok I.M. et al.* Magnetic storm of November, 2004: Solar, heliospheric, and magnetospheric disturbances // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2007. V. 70. N. 2–4. P. 334.
 15. *Архангельская И.В., Архангельский А.И., Котов Ю.Д., Кузнецов С.Н. и др.* Исследование гамма-излучения солнечных вспышек октября–ноября 2003 года по данным аппаратуры АВС-Ф на ИСЗ КОРОНАС-Ф // *Астрономич. вестник*. 2006. Т. 40. № 4. С. 331.
 16. *Arkhangelskaja I.V., Arkhangelsky A.I., Kotov Yu.D., Kuznetsov S.N.* The investigation of the spectra of solar events observed in October–November 2003 // *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, IAU Symposium*. V. 223. Cambridge, UK. Cambridge University Press, 2004. P. 439.
 17. *Котов Ю.Д., Архангельская И.В., Архангельский А.И., Глянченко А.С. и др.* Исследование гамма-излучения солнечной вспышки 29 октября 2003 г. по данным приборов АВС и СОНГ на ИСЗ КОРОНАС-Ф // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2005. Т. 69. № 6. С. 768.
 18. *Архангельская И.В., Архангельский А.И., Котов Ю.Д., Калмыков П.А. и др.* Изучение характеристик солнечной вспышки 20 января 2005 г. в высокоэнергетическом гамма-диапазоне по данным аппаратуры АВС-Ф // *Сб. науч. тр. «Научная сессия МИФИ-2007»*. М.: МИФИ, 2007. Т. 7. С. 19.
 19. *Arkhangelskij A.I., Arkhangelskaja I.V., Glyanenko A.S., Kotov Yu.D.* The observation of gamma-ray emission during January 20, 2005 solar flare // *Abstr. SEE2007*. 2007. P. 50.
 20. *Костина М.С., Архангельская И.В., Архангельский А.И., Аманджолова Д.Б. и др.* Изучение слабых солнечных вспышек по данным аппаратуры АВС-Ф на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф // *Сб. науч. тр. «Научная сессия МИФИ-2008»*. М., МИФИ: 2008. Т. 9. С. 113.
 21. *Arkhangelskaja I.V., Kotov Yu.D., Kostina M.S., Arkhangelsky A.I. et al.* Faint solar flares with hard X-ray and gamma emission observed by AVS-F onboard CORONAS-F satellite // *Proc. 37th Committee of Space Research Scientific Assembly (COSPAR 2008)*. 2008 (in press).
 22. *Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskij A.I., Glyanenko A.S., Kotov Yu.D.* Thin structure of temporal profiles of solar flares January 15, 17 and 20 2005 by data of AVS-F apparatus onboard CORONAS-F satellite // *Abstr. SEE2007*. 2007. P. 37.
 23. *Архангельская И.В., Архангельский А.И., Глянченко А.С., Котов Ю.Д. и др.* Изучение поведения временных профилей гамма-излучения солнечных вспышек января 2005 г. в различных энергетических диапазонах по

- данным аппаратуры АВС-Ф, установленной на ИСЗ КОРОНАС-Ф // Тр. Всерос. конф. «Экспериментальные и теоретич. исслед. основ прогнозирования гелиогеофизической активности» / Под ред. В.Н. Обридко, В.В. Зайцев. Троицк, 2006. С. 15–20.
24. *Архангельская И.В., Архангельский А.И., Котов Ю.Д., Кузнецов С.Н. и др.* Гамма-всплески, зарегистрированные аппаратурой АВС-Ф на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф в 2001–2005 гг. в низкоэнергетическом гамма-диапазоне // Космич. исслед. 2007. Т. 45. № 3. С. 278.
 25. *Arkhangelskaya I.V., Arkhangelskii A.I., Glyanenko A.S., Kotov Yu.D. et al.* The GRB detected in low energy gamma-ray band by AVS-F apparatus onboard CORONAS-F satellite in 2001–2005 years // Proc. Eleventh Marcel Grossmann Meeting on General Relativity / Еды. Н. Kleinert, R.T. Jantzen, R. Ruffini. World Scientific. Singapore, 2008 (in press).
 26. *Arkhangelskaja I.V., Afonina I.V., Arkhangelskii A.I., Borodina E.A. et al.* Preliminary results of database treatment from AVS-F apparatus in energy range 0.1–11 MeV // Proc. 18th European Cosmic Ray Symp. Moscow, Russia, July 2002. P. 38.
 27. *Архангельская И.В., Аманджолова Д.Б., Архангельский А.И., Котов Ю.Д.* Изучение квазистационарных экваториальных высыпаний по данным аппаратуры АВС-Ф // Сб. науч. тр. «Научная сессия МИФИ-2005». М.: МИФИ, 2005. Т. 7. С. 31.
 28. *Архангельская И.В., Аманджолова Д.Б., Архангельский А.И., Котов Ю.Д.* Исследование зависимости квазистационарных экваториальных высыпаний от Kp - и Dst -индексов геомагнитной активности по данным аппаратуры АВС-Ф // Сб. науч. тр. «Научная сессия МИФИ-2007». М.: МИФИ, 2007. Т. 7. С. 17.
 29. *Архангельская И.В., Аманджолова Д.Б., Архангельский А.И., Котов Ю.Д.* Свойства квазистационарных экваториальных высыпаний по данным аппаратуры АВС-Ф на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф // Астрономич. вестник. 2008. Т. 42. № 6 (в печати).
 30. *Amandzolova D.B., Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy A.I., Kotov Yu.D. et al.* The analysis of quasistationary equatorial precipitations observation frequency dependence from the geomagnetical activity level // Proc. 20th European Cosmic Ray Symp. in Lisbon, Portugal. 2007
<http://www.lip.pt/events/2006/ecrs/proc/ecrs06-s0-189.pdf>