

На правах рукописи

СТРУМИНСКИЙ Алексей Борисович

ДИНАМИКА И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ

01.03.03 – Физика Солнца

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте космических исследований РАН

Официальные оппоненты:

Дорман Л.И. - д.ф.-м.н., проф., Израильский центр космических лучей и космической погоды; ИЗМИРАН

Панасюк М.И. - д.ф.-м.н., проф., НИИЯФ МГУ

Степанов А.В. - д.ф.-м.н., ГАО РАН

Ведущая организация Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 7 декабря 2011 г в 11:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32, 2-ой подъезд, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан « » _____ 20 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.03

кандидат физ.-мат. наук

Т.М. Буринская



Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Ускорение космических лучей в источнике и их распространение до наблюдателя являются фундаментальной и нерешенной проблемой физики космических лучей. Солнце и гелиосфера – наиболее доступные для изучения источники космических лучей. О наличии мощных ускорительных процессов в Солнечной системе можно судить по двум группам наблюдательных фактов.

Во-первых, во время активных процессов на Солнце наблюдается нетепловое электромагнитное (ЭМ) излучение в широком диапазоне длин волн, свидетельствующее о взаимодействии с магнитными полями и ядрами в атмосфере Солнца ускоренных электронов и протонов. Время наблюдения нетеплового излучения отождествляют с «импульсной фазой» солнечных вспышек. Эти ускоренные заряженные частицы принято называть «взаимодействующими», их спектр простирается от тепловых ($\sim 10^6 - 10^7$ К) до релятивистских энергий (Ramaty et al., 1993). Большинство наблюдений показывает, что длительность жесткого (нетеплового) и мягкого рентгеновского (теплового) излучения различается примерно на порядок и составляет 1-10 мин и 10-100 мин. Здесь меньшие величины соответствуют «импульсным» солнечным вспышкам, а большие «длительным» вспышкам.

Во-вторых, в гелиосфере на фоне высокой солнечной активности наблюдаются возрастания интенсивности космических лучей (протонов, ионов и электронов) в диапазоне энергий от нескольких миллионов градусов до единиц МэВ/электрон и единиц ГэВ/нуклон, которые часто совпадают с мощными солнечными вспышками. Их длительность бывает от нескольких часов до нескольких дней. Частицы, вызывающие такое возрастание, принято называть солнечными космическими лучами (СКЛ) или в англоязычной литературе солнечными энергичными частицами (solar energetic particles- SEP). Однако наблюдающаяся временная корреляция не доказывает того, что частицы, взаимодействующие в солнечной атмосфере и распространяющиеся в межпланетном пространстве, были ускорены в одном источнике и принадлежат одной популяции. Точность определения момента выхода СКЛ в гелиосферу по наблюдениям вблизи Земли составляет 10 мин, что совпадает или превосходит длительность ожидаемого ускорения 1-10 мин во вспышке. Это затрудняет

установление причинно-следственной связи. Корональные и межпланетные ударные волны, а также области взаимодействия высокоскоростных потоков солнечного ветра являются другими возможными ускорителями заряженных частиц в гелиосфере (Reams, 1999). Относительный вклад того или иного механизма ускорения в настоящее время не известен.

Представления об импульсных и длительных вспышках являются основой классификации событий СКЛ по типу родительской вспышки, так называемой «современной парадигмы» (Reams, 1999; Cliver, 2009). Согласно этой точке зрения, в межпланетном пространстве после импульсных вспышек распространяются частицы СКЛ, которые ускорены непосредственно в импульсной фазе, а после длительных вспышек – ускоренные на ударной волне коронального выброса массы (КВМ). Главными аргументами в пользу ускорения частиц СКЛ, распространяющихся после длительных вспышек, на ударной волне были: широта фронта распространения СКЛ в гелиосфере; химический и зарядовый состав ионов, характерный для короны и солнечного ветра; отсутствие явной связи между интенсивностью γ -лучей и потоками «распространяющихся» протонов в межпланетном пространстве. В основе этих представлений лежал анализ наблюдений СКЛ малых энергий (<50 МэВ/нуклон) в пределах земной орбиты и в плоскости эклиптики. Необходимо отметить, что, по мнению некоторых исследователей (Tylka et al., 2005; Reames, 2009), данные наблюдений СКЛ высоких энергий также не противоречат модели ускорения на ударной волне.

Альтернативная точка зрения, исторически более ранняя («старая парадигма»), основывается на анализе высокоэнергичной (>500 МэВ) части спектра солнечных протонов и предполагает, что длительная вспышка, сопровождаемая КВМ, может быть главным источником СКЛ (Klein&Trottet, 2001; Kallenrode, 2003). В этом случае ударная волна КВМ не является главным ускорителем, но создает благоприятные условия для выхода и распространения частиц (или их ускорения) после отрыва КВМ, поднимая вверх петли и открывая закрытые силовые линии в различных областях короны. Если ускорение и последующее удержание СКЛ происходит длительное время высоко в короне, то малые потоки γ -излучения и корональный состав СКЛ в межпланетном пространстве являются ожидаемым фактом. Отметим, что недавний анализ всей совокупности данных по солнечным протонам малых энергий в событиях 1997-2006 гг. (Cane et al., 2010) показывает, что деление на два класса является большим упрощением.

Существующие в настоящее время две конкурирующие парадигмы возникновения СКЛ – ускорение на ударной волне КВМ и ускорение непосредственно во вспышечной области – были сформулированы на основе данных по малым (<50 МэВ/нуклон) и большим (>500 МэВ/нуклон) энергиям, соответственно. Максимальные потоки солнечных протонов больших энергий на орбите Земли наблюдаются непосредственно после вспышек, а протоны малых энергий - при прохождении ударных волн в солнечном ветре. Для исследования динамики спектра солнечных протонов в течение всего события и определения вклада того или иного механизма ускорения в наблюдаемые потоки СКЛ необходимо использование данных как спутниковых детекторов, так и нейтронных мониторов (НМ).

Представления о месте ускорения СКЛ и их распространении в межпланетном пространстве сформировались на основе наблюдений вблизи плоскости эклиптики и на гелиоцентрических расстояниях <1 а.е.. Одной из задач КА Ulysses (1990-2009 гг.) было исследование потоков СКЛ в трехмерной гелиосфере (Simpson et al., 1992). Это предполагало изучение роли коронального магнитного поля при распространении СКЛ и вклада различных источников (ускорителей) в наблюдаемые потоки СКЛ. Орбита Ulysses проходила через полярные области гелиосферы на гелиоцентрическом расстоянии 2-3 а.е. и пересекала плоскость эклиптики вблизи орбиты Земли и Юпитера (5 а.е.). Потоки СКЛ были зарегистрированы детекторами КА Ulysses на высоких широтах гелиосферы в 2000-2001, 2006 гг., а на гелиоцентрических расстояниях ~5 а.е. в плоскости эклиптики в 1992, 1997-1998, 2003 и 2005 гг. Эти наблюдения СКЛ на высоких широтах (Dalla et al., 2003) и вблизи орбиты Юпитера (Lario et al., 2004) не укладываются в рамки «современной парадигмы» и свидетельствуют об их эффективном переносе поперек силовых линий в короне и/или гелиосфере.

В настоящее время нет однозначных ответов на вопросы, где, когда и как ускоряются СКЛ и как они распространяются до наблюдателя. Активные научные дискуссии об относительной роли вспышек и КВМ при ускорении и распространении СКЛ продолжаются до сих пор и являются основной темой большинства современных конференций по физике Солнца и космическим лучам. Дополнительные аргументы в поддержку того или иного сценария могут быть получены при исследовании новых событий и при использовании ранее недоступных

инструментов. Из всего вышеперечисленного вытекает актуальность вопросов, выбранных для исследования:

- изучение процессов многократного ускорения и удержания заряженных частиц от нескольких десятков минут до нескольких часов в длительных солнечных вспышках;
- выявление непосредственных связей между нетепловым солнечным излучением и потоками СКЛ в межпланетном пространстве;
- детальное исследование свойств потоков СКЛ в области энергий порядка сотен МэВ/нуклон, измеряемой на границе энергетических диапазонов спутниковых детекторов и нейтронных мониторов;
- изучение пространственно-временного распределения СКЛ в трехмерной гелиосфере по данным КА Ulysses.

Целью работы является разработка единого сценария развития мощных солнечных протонных событий в трехмерной гелиосфере. Для этого в работе изучается взаимодействие высокоэнергичных частиц в короне и хромосфере Солнца и их распространение до наблюдателя, находящегося в различных точках трехмерной гелиосферы.

Метод исследования заключается в непосредственном сравнении данных наблюдений для небольших групп событий, отобранных по интенсивности потоков излучения (частиц) при определенной энергии. Такой подход позволяет выявить общие закономерности, приводящие к реализации предельного параметра в выбранной совокупности событий. Пороговая интенсивность может определяться как физикой изучаемого явления, так и инструментальными ограничениями.

Новизна работы заключается в применении нового наблюдательного материала, полученного в 22-м и 23-м циклах солнечной активности, и методов его анализа. Впервые в мировой практике были использованы:

- 1) данные антисовпадатальной защиты спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (ACS SPI) в событиях 2003-2006 гг. для исследования жесткого рентгеновского излучения Солнца, которые расширяют исследуемый динамический диапазон на несколько порядков, а длительность непрерывной регистрации - до суток и более, по сравнению с наблюдениями на КА RHESSI и КОРОНАС-Ф;

2) данные по длительному солнечному γ -излучению для моделирования отклика нейтронных мониторов на поток первичных солнечных нейтронов;

3) данные Кильского электронного телескопа на борту КА Ulysses (KET/Ulysses) по потокам протонов >40 МэВ для исследования их модуляции и пространственного распределения в 1997-2007 гг. в трехмерной гелиосфере.

Это позволило:

- пронаблюдать жесткое рентгеновское излучение >100 кэВ на ранних и поздних стадиях развития длительных солнечных вспышек, что меняет традиционные представления о связи тепловых и нетепловых явлений в солнечных вспышках;

- исследовать первый в истории наблюдений космических лучей случай длительной генерации солнечных нейтронов в двух последовательных эпизодах солнечной вспышки 4 июня 1991 г., который свидетельствует о взаимодействии и ускорении протонов >100 МэВ в атмосфере более 60 мин после начала вспышки;

- открыть совпадение (множитель 2-3) временных профилей интенсивности солнечных протонов ~ 40 -100 МэВ в северных и южных полярных областях гелиосферы первые 30 ч развития событий на КА Ulysses, которое свидетельствует о симметричной инжекции и близких параметрах распространения протонов до после вспышек;

- показать отсутствие глобальных радиальных и широтных градиентов протонов 200-2000 МэВ галактических космических лучей в максимуме солнечной активности в 2000-2006 гг.

Научная и практическая ценность диссертационной работы определяется комплексным подходом к проблеме происхождения СКЛ, в котором с единой точки зрения рассматриваются задачи их происхождения и распространения. Научная ценность работы состоит в обнаружении ранее неизвестных наблюдательных фактов, которые изменяют сложившиеся представления об энергетике солнечных вспышек и ускорении в них частиц, а также о пространственно-временном распределении СКЛ в трехмерной гелиосфере. Практическая ценность работы вытекает из проведенного в диссертации анализа и интерпретации наблюдений, которые указывают новые направления исследования солнечных вспышек и космических лучей в будущем:

1) создание КА нового поколения для исследования солнечных вспышек, которые позволили бы проводить длительные (более 90 мин) и непрерывные спектральные наблюдения рентгеновского и γ -излучения с возможностью локализации источников в каждом эпизоде выделения энергии, в частности, слабого коронального источника на фоне более интенсивных источников в основаниях петель;

2) создание детекторов заряженных частиц космического базирования с низким уровнем собственного фона и высокой статистической точностью, которые позволили бы исследовать малые интенсивности СКЛ на фазе роста и спада событий, не доступные для работающих в настоящее время детекторов.

Найденные закономерности пространственного распределения СКЛ в трехмерной гелиосфере, полученные в миссии Ulysses на гелиоцентрических расстояниях >1 а.е., могут служить основой для постановки научных задач будущих космических миссий вблизи Солнца - «Интергелиозонд», Solar Orbiter и «Полярный эклиптический патруль».

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены на различных научных конференциях и семинарах:

на международных конференциях по космическим лучам (ICRC) в Калгари (Канада, 1993), Риме (Италия, 1995), Дурбане (Южная Африка, 1997), Солт-Лейк-Сити (США, 1999), Гамбурге (Германия, 2001), Цукубе (Япония, 2003), Пуне (Индия, 2005), Мериде (Мексика, 2007), Лодзи (Польша, 2009), Пекине (КНР, 2011);

на Европейских симпозиумах по космическим лучам (ECRS) в Лодзи (Польша, 2000), Москве (Россия, 2002), Лиссабоне (Португалия, 2006), Кошице (Словакия, 2008);

на ассамблеях COSPAR в Варшаве (Польша, 2000); Париже (Франция, 2004); Монреале (Канада, 2008); Бремене (Германия, 2010)

на Чепменовских конференциях Американского геофизического союза в Лонавле (Индия, 2001), Турку (Финляндия, 2004);

на международных конференциях, посвященных международному гелиофизическому году в Бад-Хоневе (Германия, 2007) и Звенигороде (2007);

на рабочих совещаниях по исследованиям на КА SOHO/STEREO (Борнмут, Англия, 2009), RHESSI (Генуя, Италия, 2009; Аннаполис, США, 2010; Глазго, Великобритания, 2011; Нанкин, КНР, 2011), КОРОНАС-Фотон (Москва, ФИАН, 2009); на Всероссийских конференциях по космическим лучам (Дубна, 2000; Москва, 2002, 2004, 2006, 2010; Санкт-Петербург, 2008); на Всероссийской астрономической конференции (Нижний Архыз, 2010); на Всероссийских конференциях по солнечно-земной физике (Иркутск, 2004; Нижний-Архыз, 2006; Пулковое, 2008, 2009, 2010, 2011); на конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва 2009, 2010, 2011), а также на научных семинарах в Институте физико-химических исследований (RIKEN, Япония, 1993); Университете Нагойя (Япония, 1993); Индийском институте геомагнетизма (IG, Индия, 2001); Оснабрюкском Университете (Германия, 2003); Кильском Университете (Германия, 2006-2008) и в Москве (ФИАН, ИЗМИРАН, ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ, ГАИШ МГУ).

Личный вклад автора заключается в постановке научной задачи, выборе и разработке методов исследования, проведении обработки данных, анализе результатов, их обобщении и интерпретации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах, где первым или единственным автором был диссертант. Далее при цитировании работы автора диссертации будут выделены подчеркиванием.

Результаты работы изложены в 20 статьях в реферируемых изданиях из списка ВАК и 26 публикациях в трудах международных и всероссийских конференций, список всех публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Краткое содержание работы

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение и содержит 275 страниц, включая 119 рисунков, 17 таблиц, список литературы из 378 наименований и приложение.

Во введении сформулированы проблематика, актуальность и цели исследований солнечных космических лучей, приведен обзор современных представлений об ускорении и взаимодействии высокоэнергичных заряженных

частиц на Солнце, а также их ускорении и распространении в межпланетном пространстве (гелиосфере).

По длительности мягкого (теплого) рентгеновского излучения солнечные вспышки классифицируют на импульсные (менее 30 мин) и длительные (более 30 мин). Вспышки делят на фазы, соответствующие различным физическим процессам. Импульсной фазой называют время наблюдения нетеплового излучения, которое генерируется ускоренными заряженными частицами. Для явлений до и после импульсной фазы, когда нетепловые процессы играют незначительную роль, используются термины предвспышечной фазы и фазы спада. Моменты времени, когда наблюдаются быстрые гидродинамические движения плазмы, называют взрывной фазой. Если в результате взрыва произошел выброс (эрупция) коронального вещества, то фазу спада называют постэруптивной. В импульсных вспышках практически отсутствует предвспышечная фаза, а фаза спада короткая, так как движения плазмы не приводят к выбросу коронального вещества и формированию постэруптивной аркады. Длительные вспышки характеризуются развитой предвспышечной фазой и сопровождаются КВМ. Во время импульсной фазы таких вспышек в излучении H_{α} становятся видимыми две ленты, расположенные по разные стороны от нейтральной линии магнитного поля и связанные между собой аркадой магнитных петель. Источники жесткого рентгеновского излучения загораются в различных точках вспышечных лент.

Информацию о взаимодействующих в солнечной атмосфере электронах можно получить, исследуя радио-, рентгеновские и γ -диапазоны ЭМ - излучения. Линейчатое γ -излучение ядер (единицы МэВ), наблюдаемое на фоне непрерывного γ -излучения релятивистских электронов, позволяет судить о протонах с энергией порядка 30 МэВ, взаимодействующих в атмосфере Солнца, а γ -линия от распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ (~65 МэВ) - о протонах с энергией >150 МэВ. Дополнительную информацию о протонах >100 МэВ, взаимодействующих в солнечной атмосфере, дают первичные солнечные нейтроны, которые регистрируются в гелиосфере. Время жизни нейтронов, их степенной энергетический спектр и чувствительность детекторов накладывают достаточно строгие ограничения на доступный для исследования вблизи орбиты Земли диапазон энергий солнечных нейтронов - от 100 до 1000 МэВ.

Принято считать, что длительности жесткого и мягкого рентгеновского излучения различаются примерно на порядок и составляют 1-10 мин и 10-100 мин, а первичное энерговыделение и основное ускорение происходят на фазе роста

мягкого рентгеновского излучения (Kahler et al., 1980). Эти соотношения укладываются в рамки однопетлевой испарительной модели вспышки, в которой электроны, ускоренные в импульсной фазе, разогревают хромосферу в основаниях петель, а разогретая плазма заполняет петлю во взрывной фазе; петля высвечивает свою энергию на фазе спада. В этом случае временные профили интенсивности нетеплового излучения (микроволны, жесткий рентген) должны быть подобны временному профилю производной по времени интенсивности мягкого рентгеновского излучения (эффект Нойперта, Neupert, 1968). Однако эффекта Нойперта не наблюдается в более 50% длительных вспышек, что показывает несостоятельность однопетлевой испарительной модели (Feldman, 1990).

Ускорение заряженных частиц может происходить длительное время в нескольких эпизодах, соответствующих различным физическим условиям, в результате чего их энергетический спектр оказывается зависящим от времени. Первые наблюдения длительного жесткого рентгеновского излучения описаны в работе (Frost&Dennis, 1971). Прямым доказательством возможности длительного взаимодействия на Солнце ускоренных протонов является регистрация в течение нескольких часов в событиях июня 1991 г. γ -излучения солнечных вспышек с помощью чувствительных детекторов на борту космических обсерваторий ComptonGRO и ГАММА-1. До июня 1991 г. длительность γ -излучения, зарегистрированная в одном событии, не превышала ~1000 с. Поэтому результаты 1991 года стали сенсацией в сообществе физиков - «солнечников» и «космиков», так как требовали реализации специальных условий на Солнце (Ramaty&Mandzhavidze, 1994). Эти наблюдения возродили интерес к проблеме длительного удержания и многократного ускорения заряженных частиц на Солнце (Ryan, 2000). Гамма-излучение с энергией более 100 МэВ и длительностью более 7 ч было зарегистрировано следующий раз только в солнечной вспышке 7 марта 2011 г. астрофизической обсерваторией Ферми (Allafort et al., 2011).

Форма временных профилей интенсивности СКЛ в той или иной точке гелиосферы зависит от свойств источника (функции инжекции) и процессов распространения в межпланетном пространстве. Функция инжекции может быть результатом действия нескольких последовательных (возможно перекрывающихся) актов ускорения частиц, их удержания и распространения вблизи источника. В гелиосфере частицы СКЛ распространяются преимущественно вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля (ММП), рассеиваясь на магнитных неоднородностях

плазмы солнечного ветра. Рассеяние на неоднородностях можно представить как диффузию вдоль и поперек регулярного магнитного поля. В силу малой величины отношения поперечного коэффициента диффузии к продольному коэффициенту $D_{\perp}/D_{\parallel} \sim 10^{-4} \div 10^{-2}$ (Zhang et al., 2003) потоки поперек поля должны быть подавлены примерно в такое же число раз. Непрерывные силовые линии межпланетного магнитного поля соединяют наблюдателя и источник СКЛ, поэтому по наблюдениям в различных точках гелиосферы можно судить о пространственных и временных свойствах их источника.

По времени прихода первых СКЛ на Землю можно оценить момент их выхода из источника в межпланетное пространство, если известна их энергия и длина силовой линии, вдоль которой они распространялись. Современные методы наблюдения на расстоянии 1 а.е. не позволяют это делать с точностью большей нескольких минут, поэтому только задержки более 10 мин между пришедшими от Солнца энергичными заряженными частицами и фотонами могут рассматриваться как соответствующие индикаторы значимых эффектов ускорения и распространения СКЛ (Klecker et al., 2006). Найденный момент выхода частиц из источника сравнивается с различными временными профилями ЭМ-излучения предполагаемой родительской солнечной вспышки и условным моментом старта КВМ от поверхности Солнца. Момент старта КВМ вычисляется из предположения равномерного или равноускоренного движения облака (наиболее удаленного от Солнца фрагмента) в поле коронографа назад до лимба, поэтому он определяется с большой ошибкой, которая зависит от положения выброса на солнечном диске. Оценки времени выхода частиц СКЛ в межпланетное пространство по наблюдаемому времени прихода протонов различных энергий по-прежнему актуальны (Reames, 2009; Базилевская и Свиржевская, 2009).

Так как источник не обязан быть протяженным ни по широте, ни по долготе, а вспышки происходят вблизи солнечного экватора в диапазоне долгот $\pm 30^{\circ}$, то в силу малой величины отношения продольного и поперечного коэффициентов диффузии возможность регистрации СКЛ в полярных широтах гелиосферы долгое время была под вопросом. Измерения вблизи Земли и на КА Ulysses в 2000-2001 гг. показали, что практически каждое заметное возрастание интенсивности СКЛ в эклиптике сопровождалось возрастанием на высоких широтах, независимо от долготы КА и положения родительской вспышки на Солнце (McKibben et al., 2003). Момент инъекции из солнечного источника на высокие широты происходил на 100-350 мин

позже, чем в плоскости эклиптики. В модели ускорения на ударных волнах время задержки и скорость ударной волны должны быть обратно пропорциональны друг другу, но этого не наблюдалось (Dalla et al., 2003a; 2003b).

Время распространения СКЛ на 5 а.е. заведомо превышает времена удержания протонов в короне Солнца и эффективного ускорения межпланетной ударной волной. Поэтому наблюдения СКЛ вблизи орбиты Юпитера предоставляют уникальную возможность исследовать непосредственно эффекты их распространения в гелиосфере. Первые наблюдения СКЛ на таких гелиоцентрических расстояниях с борта КА Voyager 1-2 (Decker et al., 1999) и Pioneer 10-11 (Hamilton, 1981) были проведены в 70-х годах прошлого века и носили эпизодический характер. Эти наблюдения показали, что свойства потоков СКЛ на расстояниях <10 а.е. определяются угловым расстоянием между долготами силовой линии КА и вспышки. Однако наблюдения высокоэнергичных ионов (>25 МэВ) в плоскости эклиптики на КА Cassini (4-7 а.е.) и вблизи Земли в 2000-2001 гг. не подтвердили этот результат (Lario et al., 2004b), так как наиболее мощные события СКЛ наблюдались в обеих точках независимо от долготного угла между вспышкой и основанием силовой линии КА.

По данным наблюдений на КА IMP-4 и Pioneer-6,-7 (McKibben, 1972) были обнаружены две фазы спада интенсивности СКЛ. Во время первой фазы, имеющей характерное время 10-20 ч, наблюдались значительные пространственные градиенты СКЛ. Во время второй фазы пространственные градиенты были малы или отсутствовали, а характерное время спада составляло более 40 ч. Различие характерных времен указывало на наличие двух принципиально разных механизмов распространения СКЛ, причем вторая фаза отождествлялась с равномерно заполненным «резервуаром» (McKibben, 1972). В работе (Reames et al., 1997) область с равномерной интенсивностью СКЛ отождествляется с пространством за фронтом ударной волны KBM. Однако последняя интерпретация не согласуется с наблюдениями на КА Ulysses на высоких широтах гелиосферы, которые показали наличие эффекта «резервуара» (Dalla et al., 2003a) в тех точках пространства, куда ударные волны еще не дошли.

В физике космических лучей, как и в физике Солнца, исследователь может только создавать новые приборы для наблюдений и совершенствовать методы анализа данных, но не может создавать сами объекты исследований и влиять на них. В каждом солнечном цикле существуют несколько событий, которые стали

определенными вехами в изучении солнечных вспышек и СКЛ. Такие события обычно являются предельными случаями реализации процессов на Солнце и/или находятся на границе эффективности приборов, поэтому их детальное изучение (“case study”) позволяет сформулировать задачи будущих исследований и определить параметры необходимых инструментов. Используя достаточно большую совокупность событий, можно изучать статистические закономерности тех или иных максимальных параметров с целью поиска общих тенденций. Однако до настоящего момента как в физике СКЛ, так и в физике Солнца практически не проводилось непосредственного сравнения наблюдений различных процессов в более чем десятке событий в одном и едином масштабе времени. Такой подход позволяет проследить взаимосвязанную и последовательную цепочку явлений на Солнце и в гелиосфере, которая свидетельствует об общем сценарии развития мощных солнечных протонных событий и их родительских вспышек.

В первой главе проанализированы результаты наблюдений жесткого рентгеновского излучения Солнца с помощью антисовпадатальной защиты спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (ACS SPI), которые сравниваются с данными других КА и наземных установок в различных диапазонах электромагнитного излучения.

В параграфе 1.1 рассмотрены методические вопросы **первой главы**. **В пункте 1.1.1** рассматривается возможность использования данных ACS SPI для исследования Солнца и КЛ. Показано, что детектор ACS SPI является эффективным инструментом для исследования солнечного жесткого рентгеновского излучения и потоков КЛ вблизи Земли.

Детекторы защиты чувствительны к первичным и вторичным γ -квантам с пороговой энергией регистрации 80 кэВ. В момент мощных солнечных рентгеновских вспышек и до прихода СКЛ ACS SPI преимущественно регистрирует солнечные γ -кванты с энергией >150 кэВ, - впервые данные ACS SPI были применены для исследования солнечных вспышек в работе (Gros et al., 2004). К сожалению, детектор ACS SPI не является спектрографом, а также не известны его функции отклика. Однако для наблюдения солнечного жесткого рентгеновского и гамма-излучения большая масса детектора и сильно вытянутая орбита КА ИНТЕГРАЛ (период обращения 72 ч) предоставляют ему преимущества по сравнению с другими детекторами. Данные ACS SPI обладают высокой статистической точностью

и длительное время свободны от влияния радиационных поясов. Временные профили темпа счета ACS SPI в некоторых событиях приведены на **рис. 1**.

Сравнение темпов счета ACS SPI и детекторов КА RHESSI и КОРОНАС-Ф в различных энергетических каналах в те моменты времени, когда проводились одновременные измерения солнечного рентгеновского и γ -излучения на борту этих КА, позволяет утверждать, что эффективная энергия фотонов, регистрируемых ACS SPI в момент солнечных вспышек, примерно на порядок выше, чем пороговая энергия 80 кэВ. В максимумах событий временные профили темпа счета детекторов RHESSI в диапазоне 0,7 – 8 МэВ соответствуют наблюдениям ACS SPI (Струминский, Зимовец, 2008, 2010). Чувствительность детекторов RHESSI явно недостаточна для исследования начала и конца развития длительных солнечных вспышек при энергиях γ -квантов >80 кэВ.

Орбиты КА RHESSI (низкая экваториальная), КОРОНАС-Ф (низкая полярная) и ИНТЕГРАЛа диктуют свои условия наблюдения солнечных вспышек. Как на низких круговых, так и на вытянутых эллиптических орбитах могут быть пропущены целые солнечные события или важные эпизоды их развития из-за влияния радиационных поясов, фона КЛ и тени Земли. Главным недостатком вытянутой эллиптической орбиты является высокий фон КЛ, который минимален на низкой экваториальной орбите. Например, в случае наблюдения западных солнечных вспышек невозможно избавиться от фона СКЛ на полярных и эллиптических орбитах. Данные ACS SPI используются далее при исследовании солнечных протонных событий.

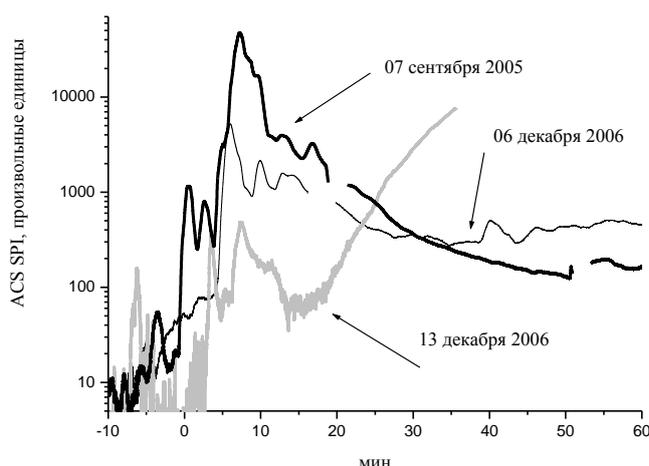


Рис. 1. Темп счета ACS SPI в некоторых длительных солнечных событиях. Возрастание 13 декабря 2006 г. примерно на 20 мин вызвано приходом солнечных протонов. (Струминский, Зимовец, 2008).

В пункте 1.1.2 обсуждается отбор событий для исследования и обосновывается возможность их сравнения между собой. Было рассмотрено более 100 событий рентгеновского балла >X1, произошедших в 1989-1992 гг. и в 1997-2006

гг., для которых были вычислены и построены временные профили эффективной температуры. Эффективная температура вспышечной плазмы оценивалась с помощью стандартного пакета GOES Solar Soft Ware по интенсивностям SXR в двух энергетических каналах GOES. По времени роста эффективной температуры до основного максимума рассмотренные события можно разделить на две группы – импульсные (менее 10 мин) и длительные (более 10 мин), в которых временные профили эффективной температуры подобны, а характерные времена развития одинаковы.

При изучении динамики развития различных солнечных вспышек важен выбор нуля шкалы времени, относительно которого рассматриваются наблюдаемые параметры. Выбор «эталонного» события и его нулевого времени позволяет подобрать нулевой момент времени для каждого события в группе. На **рис. 2** показаны временные профили температуры и рентгеновского излучения для двух событий: импульсного события 13 сентября 2005 г. и длительного события 6 декабря 2006 г., которые были приняты за «эталонные». Видно, что температура в длительном событии начинает расти раньше и спадает дольше, чем в импульсном (левая панель). Такое поведение температуры соответствует наблюдениям нетеплового рентгеновского излучения (правая панель) и, следовательно, ускорению электронов. Выбор нулевого момента времени приводит к подобию временных профилей нетеплового излучения – микроволнового и жесткого рентгеновского.

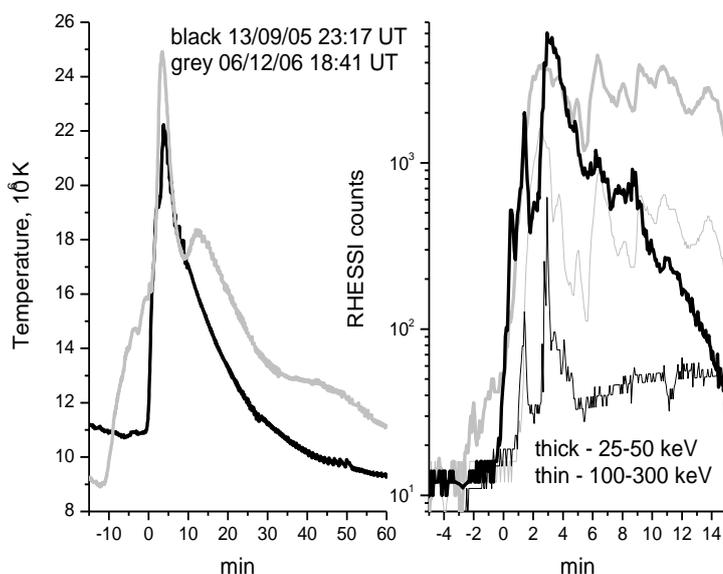


Рис. 2. Сравнение импульсного события 13 сентября 2005 г. (черные кривые) и длительного 6 декабря 2006 г. (серые кривые). Левая панель: температура плазмы. Правая панель: темп счета RHESSI 25-50 кэВ (толстые кривые) и 100-300 кэВ (тонкие кривые).

В параграфе 1.2 проверяется эффект Нойперта в некоторых импульсных и длительных вспышках. Производная по времени интенсивности мягкого рентгеновского излучения GOES сравнивалась с наблюдаемыми потоками жесткого рентгеновского различной энергии (ACS SPI и RHESSI) и микроволнового излучения. Показано, что ускорение электронов с переменным спектром в нескольких эпизодах, продолжающееся длительное время и соответствующее различным физическим условиям, приводит к отсутствию эффекта Нойперта, как в длительных, так и в импульсных событиях. На фазе спада мягкого рентгеновского излучения длительных вспышек (**рис. 3**) обнаружены пики нетеплового излучения, причем отношение максимальных интенсивностей микроволнового и жесткого рентгеновского излучения в них больше, чем в основном пике, где эффект Нойперта наблюдается (Струминский, Зимовец, 2008). Это свидетельствует о преимущественном ускорении и взаимодействии электронов в оптически тонкой мишени и малой доли их энергии, идущей на нагрев плазмы, т.е. о корональном источнике высокоэнергичных частиц ($>10^5$ км, 10^9 см⁻³).

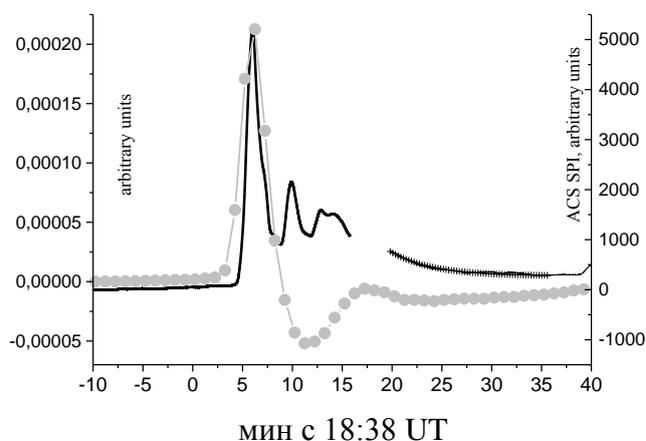


Рис. 3. Отсутствие эффекта Нойперта на фазе спада вспышки 6 декабря 2006 г. Темп счета ACS SPI – черная кривая, производная по времени SXR излучения GOES – серые кружки.

Параграф 1.3 посвящен исследованию связи между тепловым (мягкий рентген) и нетепловым (жесткий рентген и микроволны) излучением в солнечных вспышках. По данным КА GOES вычислялась эффективная температура вспышечной плазмы, которая сравнивалась с интенсивностью жесткого рентгеновского излучения по данным ACS SPI и RHESSI. В **пункте 1.3.1** рассмотрены наблюдения солнечной вспышки 6 декабря 2006 г., в которой впервые удалось измерить жесткое рентгеновское излучение >150 кэВ в предвспышечной фазе (Струминский, Зимовец, 2010). Причем оно наблюдалось на 5 мин раньше, чем начало рентгеновской вспышки GOES. Температура вспышечной плазмы в

предвспышечной и импульсной фазах оказалась пропорциональной логарифму интенсивности жесткого рентгеновского излучения (**рис. 4**). Это показывает, что электроны, ответственные за жесткое рентгеновское излучение, были инициатором и основным источником нагрева вспышечной плазмы, а ускорение частиц и нагрев плазмы являются системой с положительной обратной связью. Связь между температурой и интенсивностью жесткого рентгеновского излучения исчезает после начала взрывного расширения плазмы, когда ее охлаждение становится эффективнее нагрева нетепловыми электронами. Рентгеновское излучение > 100 кэВ не наблюдалось детекторами КА RHESSI в предвспышечной фазе из-за их низкой чувствительности.

Если считать импульсной фазой те моменты времени, когда наблюдаются нетепловые процессы, то необходимо признать, что взаимодействие ускоренных электронов реализуется в принципиально разных и изменяющихся во времени физических условиях. Возможно, резонансные пики на частоте 245 МГц (**рис. 4**) являются индикатором перехода к новым физическим условиям ускорения и взаимодействия электронов в среде с малой плотностью на фоне быстрого подъема эруптирующего волокна (Струминский, 2010).

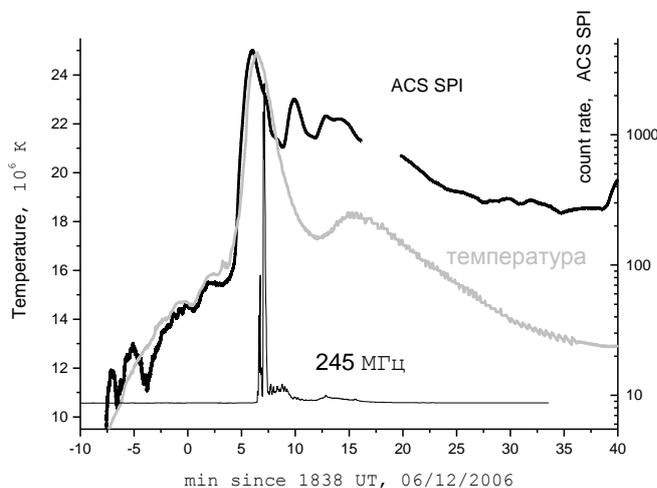


Рис. 4. Температура вспышечной плазмы (серая кривая, левая шкала) и темп счета ACS SPI (черная кривая, правая шкала), а также интенсивности радиоизлучения 245 МГц (Струминский, Зимовец, 2010).

Импульсные события, рассмотренные в **пункте 1.3.1.**, характеризуются отсутствием предвспышечной фазы, развитием нетепловых явлений в течение менее 10 мин и быстрым спадом эффективной температуры с характерным временем ~ 20 мин (см. **рис. 2**). На фазе роста наблюдаются 2-3 эпизода энерговыделения длительностью около 1 мин, которые отождествляются с отдельными возрастаниями жесткого рентгеновского излучения меньшей

длительности. События начинались с ускорения электронов и нагрева плазмы над системой вспышечных петель, причем моменты времени с пиками ACS SPI не оказывали существенного влияния на энергетику исследуемых событий. Эффективная температура была пропорциональна логарифму темпа счета RHESSI в канале 25-50 кэВ.

В **пункте 1.3.2** обсуждаются длительные события. Они характеризуются развитой предвспышечной фазой и более долгой фазой спада температуры, чем в импульсных событиях. Значительные потоки жесткого рентгеновского излучения наблюдаются более одного часа, как в предвспышечной фазе, так и после максимального импульса жесткого рентгеновского излучения в длительных событиях (см. **рис. 1-2**). Высказано предположение, что длительные события являются цепочкой перекрывающихся импульсных, которые инициируются при последовательной эрупции нескольких волокон в одной активной области (Струминский, 2010b).

В мощных протонных вспышках 2003-2006 гг. были получены свидетельства ускорения частиц на Солнце в нескольких эпизодах порядка 1-2 мин и суммарной длительностью более 15 мин. В работе (Струминский, Зимовец, 2007) были рассмотрены импульсные фазы трех мощнейших вспышек 23-го цикла (28 октября 2003 г., 20 января и 7 сентября 2005 г.), которые длились более 15 мин и состояли, по крайней мере, из трех актов энерговыделения, различавшихся своим проявлением в мягком (1-8 Å, GOES) и жестком (>150 кэВ, ACS SPI) 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 6-7 минут развития импульсной фазы. В серии вспышек декабря 2006 г. была обнаружена сходная структура временных профилей нетеплового излучения (Struminsky&Zimovets, 2007), как и в событиях 2003 и 2005 гг. В нескольких двухленточных вспышках, чье положение на солнечном диске было благоприятным для пространственных наблюдений RHESSI жесткого рентгеновского излучения, удалось проследить движение источника излучения вдоль лент и связать отдельные всплески его интенсивности с разнесенными в пространстве актами ускорения частиц и энерговыделения (Zimovets & Strumisky, 2009).

Рассмотрение случаев наблюдения солнечного гамма-излучения >0,7 МэВ (RHESSI) в шести протонных вспышках относительно нулевого времени, выбранного

с учетом подбора временных профилей температуры (рис. 5), показало, что ускорение электронов с наиболее жестким спектром происходило в конце событий на фазе спада температуры.

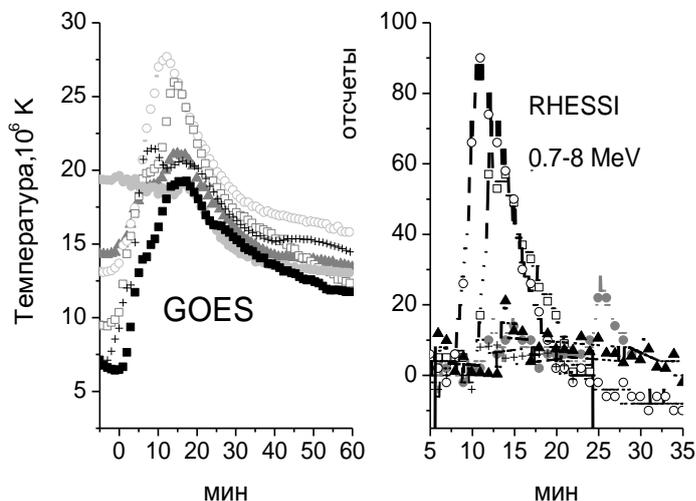


Рис. 5. Левая панель: температура вспышечной плазмы; правая панель: темп счета детектора КА RHESSI в событиях: 14.07.00 (черные квадраты); 02.10.03 (открытые квадраты); 17.01.05 (серые треугольники); 19.01.05 (серые кружки); 20.01.05 (открытые кружки); 13.12.06 (черные треугольники).

На основе наблюдений жесткого рентгеновского излучения (ACS SPI) и его связи с температурой вспышечной плазмы в диссертации предложен сценарий развития типичной длительной вспышки:

- 1) создается благоприятная магнитная конфигурация для запаса энергии и формирования вспышечных петель;
- 2) вблизи вершины одной из петель происходит спонтанное ускорение частиц, являющееся триггером всего события;
- 3) ускорение заряженных частиц развивается во времени и пространстве в результате подъема волокна и вовлечения в процесс новых петель, приводя к последовательному разогреву плазмы вспышечной области;
- 4) эффективная температура плазмы определяется мгновенной энергией нетепловых электронов (средней энергией и спектром) в течение первых 10-20 мин развития вспышки;
- 5) развитие неустойчивостей приводит к расширению плазмы, которое сопровождается ее эффективным охлаждением, поэтому значительные потоки ускоряющихся электронов уже не влияют на температуру вспышечной плазмы.

Исследования высокого ($\sim 10^5$ км) коронального источника ускоренных частиц, а также перестройки конфигурации магнитного поля после вспышки представляется чрезвычайно важным в связи с проблемой происхождения солнечных протонов и электронов. Для этого необходимо создание нового поколения солнечных

телескопов жесткого рентгеновского и γ -излучения с высокой чувствительностью и низким фоном.

Во второй главе рассматриваются случаи длительной (более 30 мин) генерации нейтронов во время солнечных вспышек, которые получены на основе наземных наблюдений солнечных нейтронов в 1991, 2003 и 2005 гг.

В параграфе 2.1 обсуждаются методические вопросы изучения потоков первичных солнечных нейтронов наземными детекторами. Наземные возрастания интенсивности космических лучей, вызванные приходом прямых солнечных нейтронов, являются единичными событиями в каждом солнечном цикле, поэтому их поиск и интерпретация заведомо представляют интерес. Их регистрация наиболее вероятна высокогорными нейтронными мониторами (НМ), расположенными в местах с высокой жесткостью геомагнитного обрезания космических лучей при минимальном фоне ГКЛ, около полудня местного времени при минимальной толщине атмосферы. Результаты ретроспективного статистического анализа данных высокогорного нейтронного монитора Алма-Ата с целью поиска возможных солнечных нейтронных событий описаны в **параграфе 2.2**. Вблизи мощных рентгеновских вспышек отдельные новые нейтронные события обнаружены не были, но метод наложения эпох показал наличие статистически значимого возрастания (Аушев и др., 2003; Aushev et al., 1999).

Параграф 2.3 посвящен редким наблюдениям солнечных нейтронов на Земле, чья интерпретация была невозможна без предположения о длительном взаимодействии высокоэнергичных протонов в солнечной атмосфере. **В пункте 2.3.1** рассматривается событие 4 июня 1991 г. (X12.0) по данным НМ Норикура (Takakhashi et al., 1991). Временной профиль этого нейтронного события оставался загадкой до публикации первых результатов наблюдений на борту орбитальной обсерватории ComptonGRO прибором OSSE (Oriented Spectroscopic Scintillation Experiment) γ -излучения этой вспышки (Murphy et al., 1993). В темпе счета НМ Норикура удается выделить два максимума: первый наблюдался в 03:41-04:10 UT, а второй - в 04:15-05:05 UT.

Очевидный разрыв в данных наблюдения γ -линии 2,223 МэВ возник между 04:05 и 04:40 UT на ночной стороне орбиты КА ComptonGRO, тогда же наблюдался новый максимум интенсивности микроволнового излучения (**рис. 6**). Эти данные свидетельствуют о втором эпизоде ускорения частиц вблизи Солнца примерно через

30 мин после импульсной фазы вспышки, когда фронт КВМ находился далеко от Солнца и протоны, ускоренные на ударной волне, не могли генерировать наблюдаемые нейтроны (Struminsky et al., 1994).

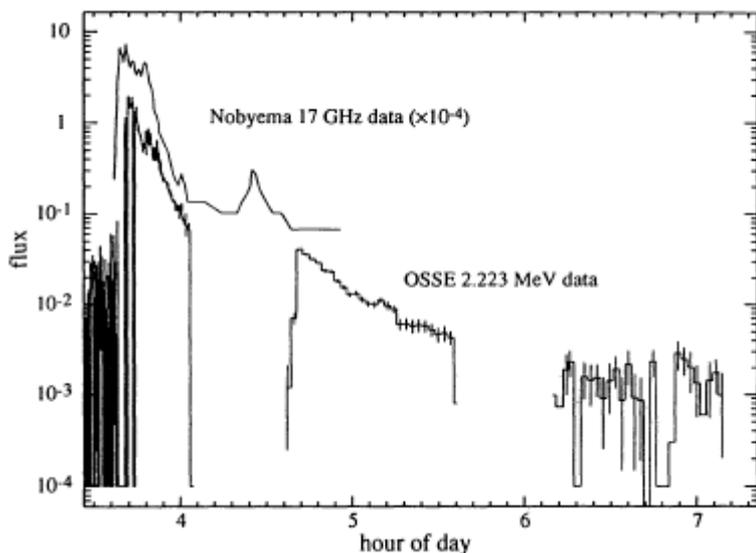


Рис. 6. Наблюдения линии 2.223 МэВ детектором OSSE на трех последовательных орбитах и поток радиоизлучения 17 ГГц (обсерватория Нобейма). (Struminsky et al., 1994).

Ожидаемое возрастания темпа счета НМ Норикура в промежуток времени от t_1 до t_2 вычислялось по формуле

$$N(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \int_{E_1}^{E_2} S[E, T - D/c/(\beta^{-1} - 1)] P(E) Y(E) dE dT / D^2,$$

где $S(E, T)$ – функция источника нейтронов на Солнце, зависящая от энергии нейтрона E и времени на Солнце T , $P(E)$ - вероятность распада нейтрона, $Y(E)$ - чувствительность детектора и D - расстояние между Солнцем и Землей. Здесь E_1 и E_2 , соответственно, минимальная и максимальная энергия нейтронов в первичном спектре. Начало возрастания определяется величиной E_2 , а характер спада зарегистрированного временного профиля - E_1 .

В работе (Struminsky et al., 1994) впервые было предложено рассматривать два длительных эпизода генерации высокоэнергичных нейтронов с различным спектром. В первом эпизоде предполагалась функция источника, пропорциональная степенному спектру первичных нейтронов и временному профилю γ -линии 2,223 МэВ (OSSE/CGRO). Во втором эпизоде, когда CGRO находилась на ночной стороне Земли, временной профиль источника подбирался исходя из наилучшего согласия между расчетным и наблюдаемым временными профилями. Показатель энергетического спектра нейтронов был дополнительным параметром расчетов.

Оказалось, что спектр нейтронов в диапазоне энергий 0,1-3 ГэВ в первом эпизоде был мягче, чем во втором. Предыдущие нейтронные события, зарегистрированные мировой сетью НМ - 3 июля 1982 г. и 24 мая 1990 г., не противоречили модели с импульсной инжекцией и с постоянным спектром.

В пунктах 2.3.2 и 2.3.3 представлены два других примера длительной генерации солнечных нейтронов во время мощных вспышек 28 октября 2003 г. и 7 сентября 2005 г., которые сопровождались жестким рентгеновским и γ -излучением. Возрастания темпа счета нейтронных мониторов Цумеб (Tsumeb) и Чакалтая (Chacaltaya) в момент этих вспышек были интерпретированы как вызванные приходом солнечных нейтронов. Показано, что начальная фаза возрастания соответствует выходу нейтронов с поверхности Солнца и с интенсивностью, пропорциональной темпу счета ACS SPI. Однако при этом не удается описать конечную стадию наблюдавшихся возрастаний - второй максимум 28 октября 2003 года и длительный спад 7 сентября 2005 года (Struminsky, 2005b; Михайлов и Струминский, 2007). Предположение об изменении в конце событий спектра нейтронов и коэффициента пропорциональности между функцией источника и темпом счета ACS SPI, который зависит от соотношения числа ускоренных протонов и электронов в источнике, позволяет преодолеть эту трудность.

Время UT мощных солнечных вспышек 5 и 6 декабря 2006 г. практически совпадает со временем UT солнечных вспышек 28 октября 2003 г. и 7 сентября 2005 г. соответственно. Если бы в этих событиях 2006 г. были бы генерированы солнечные нейтроны, то благоприятными местами для наземной регистрации нейтронов были бы НМ Цумеб и Чакалтая. Если считать, что не изменилась эффективность регистрации нейтронов по сравнению с событиями 28 октября 2003 г. и 7 сентября 2005 г., то ожидаемый отклик НМ оказывается меньше статистических погрешностей. Действительно, в событиях 5 и 6 декабря 2006 г. значимые возрастания темпа счета НМ, вызванные приходом первичных солнечных нейтронов, не наблюдались.

Таким образом, в **Главе 2** показано, что вспышечный источник нейтронов с энергией >100 МэВ, а, следовательно, и ускоренных протонов, может существовать несколько десятков минут после начала вспышки.

В третьей главе рассматривается связь потоков СКЛ в 1989-2006 гг. с солнечным источником в различных моделях их распространения в гелиосфере.

Основное внимание уделяется протонам с энергиями >100 МэВ, которая соответствует верхнему энергетическому диапазону детекторов на спутниках и атмосферный порог 430 МэВ регистрации протонов НМ.

В параграфе 3.1 рассмотрены эффекты, связанные с приходом первых солнечных протонов на Землю. Временем прихода релятивистских протонов традиционно считалось начало наземного возрастания интенсивности КЛ (GLE), зарегистрированное одним из НМ сети. Неоднозначность определения момента прихода солнечных протонов по данным НМ связана с собственным фоном детектора, вариациями порога жесткости геомагнитного обрезания и направления конуса приема. Были обнаружены два случая, в которых детектор ACS SPI оказался более эффективным инструментом для наблюдения начала протонного возрастания на орбите Земли, чем сеть НМ: 17 января 2005 г. (Struminsky, 2011) и 13 декабря 2006 г. (Струминский, Зимовец, 2009; Struminsky&Zimovets, 2009). В этих событиях задержка прихода релятивистских протонов на Землю относительно вспышки жесткого рентгеновского излучения считалась значимой и свидетельствовала об ускорении протонов позднее. Возрастание темпа счета ACS SPI, вызванное приходом релятивистских протонов, наблюдалось раньше и соответствовало их ускорению в момент вспышки (рис. 7). Этот факт подчеркивает необходимость создания детектора солнечных протонов и электронов космического базирования с низким уровнем собственного фона, который необходим для исследования потоков КЛ малой интенсивности.

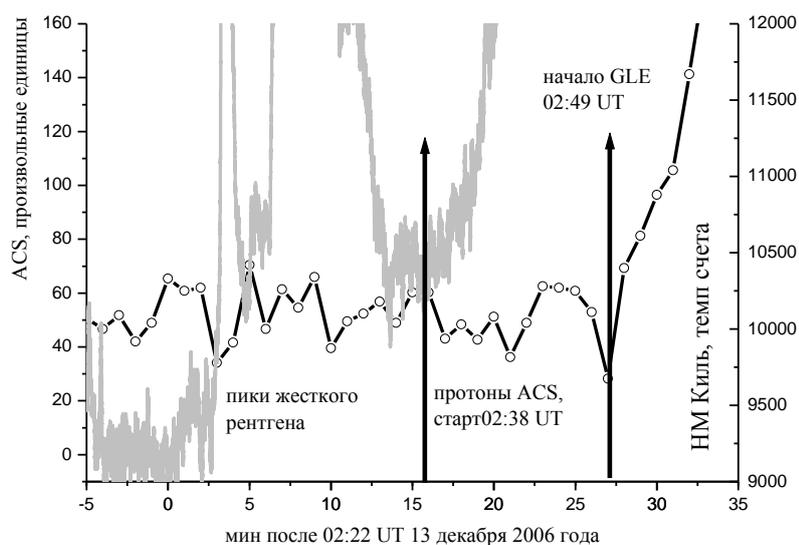


Рис. 7. Регистрации более раннего прихода протонов в событии 13 декабря 2006 г. прибором ACS SPI (серая кривая) по сравнению с НМ Киль (открытые кружки). (Струминский, Зимовец, 2009).

Дисперсия по скоростям при распространении частиц различных энергий затрудняет восстановление функции инжекции в межпланетное пространство по данным интегральных детекторов. Так как промежутки времени между соседними эпизодами ускорения в импульсной фазе составляют 1-2 мин, то в большинстве событий не представляется возможным исследовать отдельные акты ускорения в импульсной фазе с помощью наблюдения СКЛ в межпланетном пространстве. Однако при благоприятных условиях распространения протонов в начале события вариации их спектра, наблюдаемые вблизи Земли, могут отражать изменения спектра в источнике, которые происходят в масштабе более 10 мин (Belov et al., 1995). Первые оценки показали, что после длительных солнечных вспышек с ярко выраженной постэруптивной фазой наблюдаются изменения спектра солнечных протонов, свидетельствующие о двух последовательных эпизодах ускорения, отстоящих более чем на 10 мин друг от друга, причем спектр во втором эпизоде был жестче. Сравнение вариаций спектра протонов в событиях 20 января 2005 г. и 14 июля 2000 г. позволило сделать вывод об относительно более раннем развитии высокоэнергичных процессов 20 января 2005 г. (Struminsky, 2005).

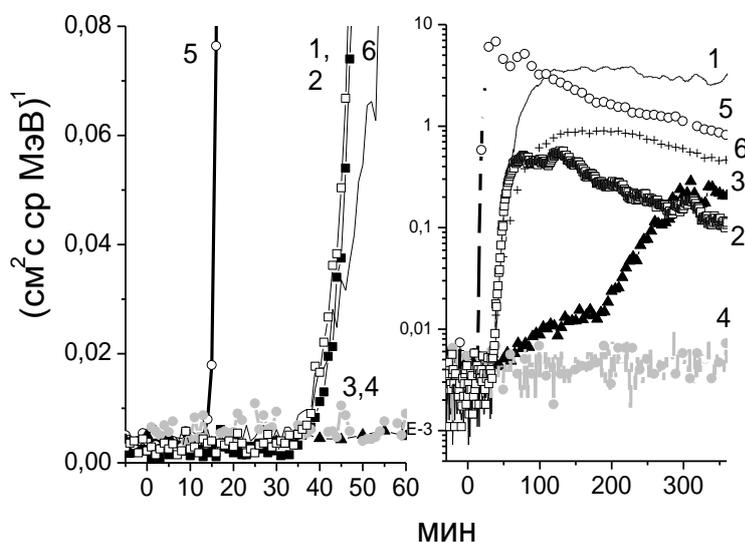


Рис. 8. Временные профили интенсивности протонов 80-165 МэВ в различных масштабах в событиях:
1–14.07.00; **2** - 02.10.03;
3 -17.01.05; **4** - 19.01.05;
5 - 20.01.05; **6** – 13.12.06.
 (Струминский, 2011).

Учет подобия временных профилей температуры в длительных вспышках (**пункт 1.3.3**) приводит к неожиданным результатам относительно времени регистрации первых солнечных протонов в канале 80-165 МэВ детектора на спутнике GOES от выбранного нулевого времени (**рис. 8**). Начало возрастания интенсивности протонов наблюдается на 35-й мин, что не противоречит их ускорению одновременно с электронами во вспышке и выходу в межпланетное

пространство на фазе спада температуры (примерно на 25-й мин) в момент отрыва КВМ (Струминский, 2011; Struminsky, 2011). Это свидетельствует о характерной перестройке конфигурации магнитного поля в конце импульсной фазы, которая приводит к изменению режима нагрева плазмы и способствует выходу СКЛ в гелиосферу. Ранний приход протонов в событии 20 января 2005 г. является следствием уникальных условий распространения, сложившихся в результате предшествующих солнечных вспышек.

Параграф 3.2 посвящен исследованию выдающегося солнечного протонного события 20 января 2005 г., в котором протоны с энергией более 80 МэВ распространялись без рассеяния до Земли, и временные профили их интенсивности определялись свойствами источника на Солнце примерно первые 30 мин после их выхода в межпланетное пространство (Струминский, 2006). Аппроксимация временных профилей протонных каналов 80-165 и 200-500 МэВ детектора GOES позволила определить зависимость от времени функции инжекции и энергетический спектр протонов в источнике. Характерные времена модельной функции источника солнечных протонов соответствуют наблюдениям γ -излучения от распада π -мезонов в этом событии.

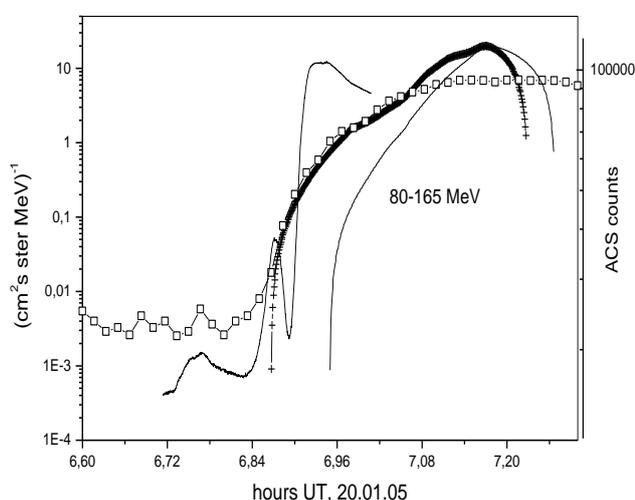


Рис. 9. Сравнение интенсивности протонов 80-165 МэВ в модели свободного распространения (кресты) с наблюдениями (1-мин средние, открытые квадраты) для функции инжекции, пропорциональной темпу счета ACS SPI 20 января 2005 г. (Струминский, 2006).

В параграфе 3.3 исследуется роль длительного источника в диффузионной модели распространения СКЛ. На масштабе времени более получаса становится существенным рассеяние солнечных протонов на магнитных неоднородностях, и модель свободного распространения не применима. Были рассмотрены солнечные протонные события (СПС) 1989-2006 гг., сопровождавшиеся наземными

возрастаниями интенсивности космических лучей. Показано, что интенсивность потоков солнечных протонов, измеренная в канале 84-165 МэВ на спутниках серии GOES первые 15-20 ч развития СПС, может быть аппроксимирована диффузионной моделью распространения, причем инжекция протонов из источника на Солнце в межпланетное пространство должна проходить в несколько этапов в течение часов (Струминский, 2003а; 2006).

Единственным экспериментальным подтверждением существования протонов с энергией >100 МэВ вблизи Солнца столь длительное время является регистрация γ -квантов от π^0 -распада во вспышках 11 и 15 июня 1991 г. космическими обсерваториями CGRO и ГАММА-1. На основании модели распространения в работе сделана оценка числа протонов в источнике в различные моменты времени, причем для события 11 июня 1991 г. получено качественное, а для 15 июня 1991 г. – количественное согласие с числом протонов, необходимых для генерации наблюдаемого γ - излучения. Это свидетельствует о том, что и в других событиях, когда имели место процессы длительного удержания и/или ускорения протонов в корональных структурах Солнца, должно было бы наблюдаться длительное γ - излучение. Однако эти наблюдения либо не проводились вовсе, либо проводились инструментами с высоким порогом регистрации.

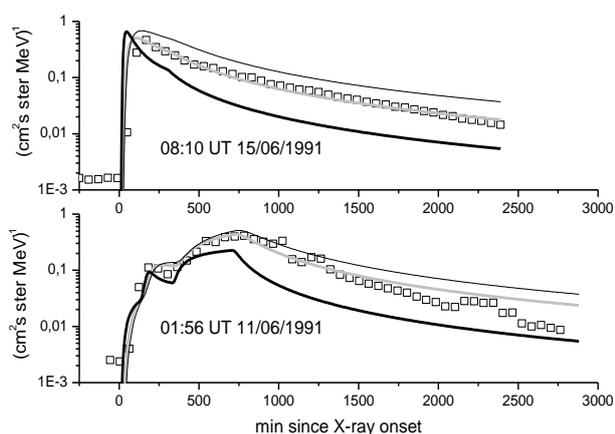


Рис. 10. Интенсивности потоков протонов 11 и 15 июня 1991 г., вычисленные в диффузионной модели при различных длинах свободного пробега (серая линия – 0,11 а.е.; толстая черная линия – 0,3 а.е.; тонкая черная линия – 0,08 а.е.) и наблюдаемые в канале GOES 80-165 МэВ (значки). (Struminsky, 2003а).

Результаты, представленные на **рис. 10**, показывают определяющую роль, которую играет функция источника по сравнению с параметрами распространения для формирования временных профилей интенсивности протонов на 1 а.е. Аналогичные вычисления были проведены для мощных протонных событий 23-го цикла (Struminsky, 2003b; Струминский, 2006).

Временной профиль интенсивности протонов в канале 80-165 МэВ имел два максимума в событии 20 января 2005 г, причем вблизи Земли наблюдалось изменение спектра протонов, которое можно интерпретировать как свидетельство нового эпизода ускорения на Солнце (Struminsky, 2005c). Наилучшее согласие между измеренными и рассчитанными интенсивностями получается в модели с длительной инжекцией протонов в межпланетное пространство с двумя максимумами. Расхождение в 1,5-2 раза между расчетными и наблюдаемыми интенсивностями солнечных протонов в начале некоторых событий, возможно, связано с сильной анизотропией их потока. Различие на поздних стадиях, примерно через сутки и более после начала возрастания, можно объяснить модуляцией потока СКЛ распространяющимися и взаимодействующими между собой структурами солнечного ветра.

Таким образом, процессы длительного удержания и/или ускорения протонов в непосредственной близости от Солнца на фазе спада мощных солнечных вспышек являются типичными, и необходимо говорить о существовании локальных радиационных поясов Солнца. Термин «локальные радиационные пояса Солнца» впервые введен Г.П. Любимовым (2002), это квазистационарные корональные ловушки солнечных космических лучей, образованные магнитными полями активной области. К сожалению, имеющиеся в настоящее время возможности для наблюдения солнечного излучения γ -линий не достаточны для их диагностики. Результаты наблюдений жесткого рентгеновского Солнца, приведенные в **Главе 1**, показывают, что электроны ускоряются и взаимодействуют в солнечной атмосфере в течение нескольких десятков минут.

В параграфе 3.4 сравниваются наблюдения наиболее мощных солнечных протонных событий 23-го цикла в полярных областях гелиосферы на борту КА Ulysses Кильским электронным телескопом (KET) и вблизи Земли протонным детектором на борту КА GOES. Для подробного анализа были отобраны события, в которых было зарегистрировано значимое превышение над фоном в канале 80-125 МэВ прибора KET/Ulysses. Большинство из этих событий сопровождалось возрастаниями интенсивности КЛ на поверхности Земли.

При анализе наблюдений СКЛ на двух КА, находящихся в различных точках гелиосферы, можно предположить два крайних случая распространения частиц до наблюдателя: 1) источник частиц локализован, причем один из аппаратов имеет с ним хорошее магнитное соединение, а другой нет; 2) источник на Солнце

протяженный в пространстве и времени, а магнитные силовые линии соединяют аппараты с различными частями источника. Так как поперечный коэффициент диффузии меньше продольного в 10^{-4} - 10^{-2} раз, то в первом случае наблюдаемые интенсивности должны отличаться примерно в такое же число раз, при сохранении корреляционной зависимости. Корреляция между двумя наблюдениями может отсутствовать во втором случае, если число частиц, попавших на данную силовую линию за счет поперечной диффузии, мало по сравнению с числом частиц, непосредственно инжектированных из источника.

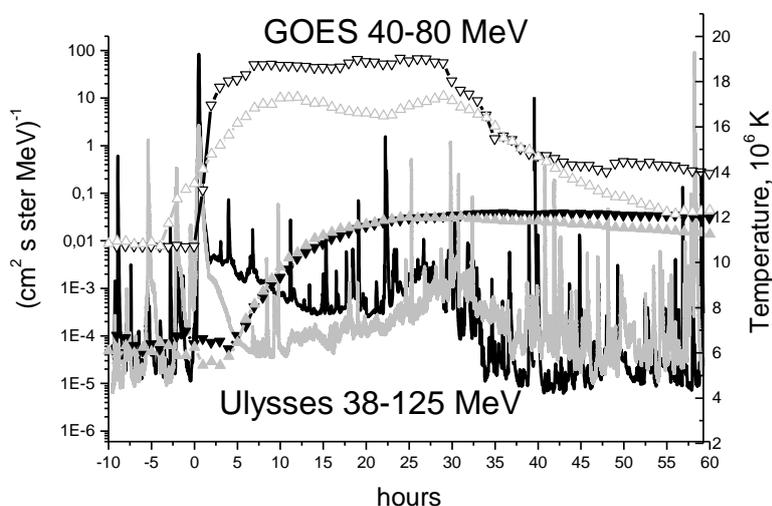


Рис.11. Температура вспышечной плазмы (кривые). Интенсивности потоков протонов в плоскости эклиптики (GOES) и на северных (14 июля 2000 г., черный) и южных (22 ноября 2001 г., серый) полярных широтах гелиосферы (Ulysses).

Для отобранных событий, наблюдавшихся в южных (июль-ноябрь 2000 г.) и северных (август-декабрь 2001 г.) полярных областях гелиосферы, оказалось, что интенсивности протонов 40-80 МэВ Ulysses различаются в 2-3 раза первые 20-30 ч после начала возрастания, независимо от взаимных координат вспышки и КА. При этом соответствующие интенсивности GOES различались на 2-3 порядка, т.е. корреляция между наблюдениями на КА Ulysses и GOES отсутствовала, а силовые линии ММП соединяли аппараты с различными частями солнечного источника. Ключевым в проведенном анализе было протонное событие, которое ассоциировалось с эрупцией волокна и рентгеновской вспышкой М класса 12 сентября 2000 г. В этом событии поток протонов вблизи Земли был минимальным, но на высоких широтах Ulysses его временной профиль интенсивности был подобен всем рассмотренным случаям. Такое подобие временных профилей (рис. 11) указывает на одинаковые механизмы инжекции и распространения протонов в полярные области гелиосферы.

Если временные шкалы в различных событиях выбраны так, чтобы совпали времена прихода протонов 40-80 МэВ на Ulysses (см. **рис. 11**), то ожидаемое время их выхода из источника в полярные области гелиосферы будет соответствовать поздней фазе спада теплового рентгеновского излучения, а в плоскости эклиптики – вблизи импульсной фазы (Struminsky et al., 2006; Струминский, 2010а). При этом инжекция протонов на северные и южные широты должна быть значительно слабее, чем в плоскости эклиптики, и симметричной относительно экватора. Интенсивность протонов вблизи Земли находилась практически на постоянном уровне более 30 ч, а на высоких широтах наблюдался ее плавный рост, что можно обеспечить только длительной и практически непрерывной инжекцией в гелиосферу. В **параграфе 1.2** показано, что повышенная эффективная температура вспышечной плазмы вызвана наличием нетепловых электронов, поэтому ее повышенные значения (**рис. 11**) свидетельствуют о возможности непосредственной инжекции частиц из солнечного источника.

Серия четырех мощных протонных вспышек в декабре 2006 г. была последним всплеском солнечной активности в 23-м цикле и последними протонными событиями, зарегистрированными KET/Ulysses в полярных широтах гелиосферы (Heber et al., 2007). На их примере исследовалась роль крупномасштабного солнечного магнитного поля при распространении СКЛ до наблюдателя, находящегося в различных точках гелиосферы, (Struminsky et al., 2009). Путем расчета магнитных силовых линий в короне внутри сферического слоя 1,5 R над фотосферой показана возможность магнитного соединения области родительских вспышек с основаниями удаленных силовых линий спирали Паркера. Это качественно объясняет особенности событий 5, 13 и 14 декабря 2006 г., наблюдаемые на КА Ulysses, GOES, STEREO. Структура коронального и межпланетного магнитного поля была сильно изменена 6 декабря в результате распространения KBM от события 5 декабря, поэтому модель не применима.

Таким образом, проведенный в **Главе 3** анализ подтверждает выводы **Главы 1 и 2**, что Солнце представляет собой протяженный в пространстве и во времени источник космических лучей, намного более сложный, чем представлялось ранее. Для моделирования временных профилей интенсивностей СКЛ в межпланетном пространстве в течение первых суток развития СПС необходимо учитывать временные и пространственные свойства функции инжекции. Напротив, процесс распространения частиц в гелиосфере (продольная и поперечная диффузия) до

наблюдателя является стабильным и практически не меняется от события к событию, пока локальные возмущения солнечного ветра не достигают наблюдателя.

В четвертой главе рассматривается влияние различных крупномасштабных структур солнечного ветра на процессы распространения СКЛ в трехмерной гелиосфере.

Сильные межпланетные возмущения оказывают влияние на космические лучи с энергией менее 1 ГэВ, увеличивая их интенсивность на сотни процентов (эффект штормовых частиц), но их влияние значительно меньше на протоны больших энергий (эффект Форбуша и его предвестник). Этот энергетический предел важен для понимания процессов ускорения и распространения КЛ в гелиосфере. Спектр СКЛ, вычисленный по данным двух высокоэнергичных каналов GOES, позволяет делать оценки ожидаемого темпа счета того или иного нейтронного монитора. Для оценки величины наземного возрастания были вычислены кратности генерации в атмосфере вблизи порога атмосферного обрезания ([Struminsky&Belov, 1997](#)) и изменение порога жесткости геомагнитного обрезания ([Struminsky&Lal, 2001](#)) в момент геомагнитных бурь. Обычно восстанавливают спектр в области малых (спутниковых) энергий по данным нейтронных мониторов. Автором была разработана методика, позволяющая выделять вариации, вызванные модуляцией ГКЛ и изменением геомагнитного порога, из общего темпа счета НМ ([Struminsky, 2001](#)). Ее применение к событиям 19-21 октября 1989 г. ([Struminsky, 2002](#)), 14-15 июля 2000 г. и 4-5 ноября 2001 г. ([Струминский, 2003b](#)) описано в **параграфе 4.1**.

Событие 19-21 октября 1989 г. является тем редким случаем, когда спектр штормовых частиц простирался непрерывно вплоть до нижней пороговой энергии НМ ([Struminsky, 2001](#); [Struminsky, 2002](#)). В обзоре ([Reames, 1999](#)) это событие приведено как пример ускорения протонов ударными волнами вплоть до ГэВ. Различие в спектре частиц в момент предповышения Форбуша и эффекта штормовых частиц позволило сделать вывод о том, что в этом событии штормовые частицы были ускорены в момент солнечной вспышки и распространялись до Земли в ловушке между двумя сходящимися магнитными стенками. Независимо такой вывод был сделан в работах ([Lario&Decker, 2001](#); [Lario&Decker, 2002](#)).

В событиях 14 июля 2000 г. и 4 ноября 2001 г. спектр солнечных протонов, полученный по данным детектора GOES и нейтронных мониторов «Апатиты» и «Москва», имел резкое колено в области энергий 200-500 МэВ во время GLE, а

спектр штормовых частиц не имел такого колена и был обрезан вблизи этой энергии (Струминский, 2003b). Сделано предположение, что излом энергетического спектра соответствует максимальной энергии эффективного удержания частиц последовательно корональными и межпланетными структурами магнитного поля (рис. 12). Такое изменение спектра было впервые обнаружено экспериментально в непосредственных измерениях спектра на спутниках и шарах-зондах в событии 2 ноября 1992 г. (Struminsky&Kohno, 1993). Наличие колена в этой области энергий и изменение жесткости геомагнитного обрезания во время геомагнитных бурь могут сильно изменить возможную интерпретацию данных НМ в момент GLE событий (Struminsky, 2003c).

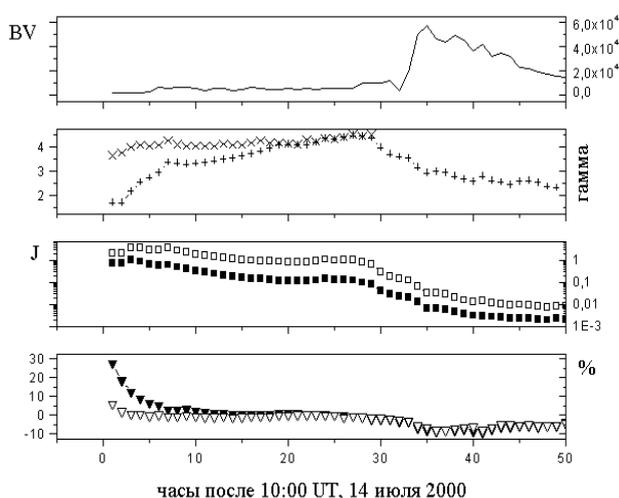


Рис. 12. Произведение напряженности ММП $B(nT)$ на скорость солнечного ветра $V(км/с)$; показатель спектра протонов GOES (вертикальные кресты) и GLE (наклонные кресты); интенсивности $J (см^2 \cdot с \cdot ср \cdot МэВ)^{-1}$ потока протонов 84-200 МэВ (открытые квадраты) и 110-500 МэВ (черные квадраты); вариации темпа счета НМ «Апатиты» (черные треугольники) и «Москва» (открытые треугольники). (Струминский, 2003b).

Если длительность инъекции сравнима со временем распространения, то невозможно разделить влияние источника и процесса распространения. Время распространения СКЛ на 5 а.е. заведомо превышает самые оптимистичные оценки длительности удержания протонов в короне и времени эффективного ускорения межпланетной ударной волной. Наблюдения СКЛ вблизи орбиты Юпитера предоставляют уникальную возможность исследовать непосредственно эффекты распространения в плоскости эклиптики (Хибер, Струминский, 2004).

В параграфе 4.2 показано, что по времени распространения протонов до 5 а.е. события на КА Ulysses можно разделить на две группы, которые характеризуются распространением протонов - вдоль (быстрый приход, 12 ч) или поперек (медленный приход, 24 ч) силовых линий ММП (рис. 13).

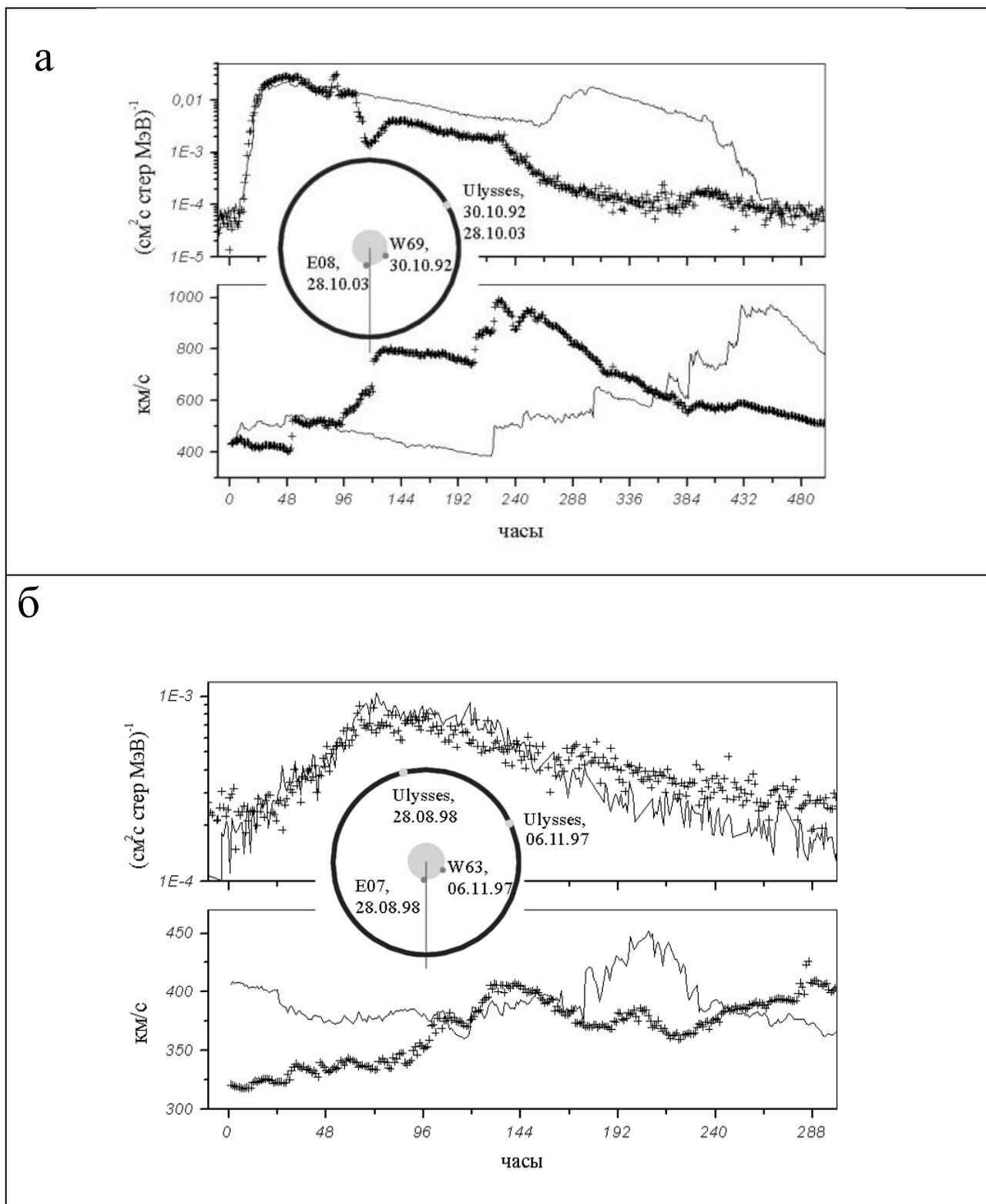


Рис. 13. Скорость солнечного ветра (Swoops/Ulysses) и интенсивность потоков протонов в канале 38-125 МэВ (KET/Ulysses) после начала рентгеновской вспышки на Солнце в событиях: а) 30 октября 1992 г. (кресты) и 28 октября 2003 г. (сплошная линия); б) 6 ноября 1997 г. (кресты) и 24 августа 1998 г. (сплошная линия). (Хибер, Струминский, 2004)

Так как быстрый или медленный приход частиц возможен независимо от координат родительской вспышки и КА Ulysses, то условия выхода протонов на благоприятную силовую линию не определяются координатами вспышки. Временные профили интенсивности солнечных протонов в каждой группе подобны примерно первые трое суток после начала рентгеновской вспышки, что подразумевает одинаковые параметры распространения частиц в гелиосфере на расстояния более 5 а.е. в начале событий. Полное число протонов, инжектированных в гелиосферу, и модуляция потока солнечных космических лучей локальными структурами солнечного ветра определяют форму временных профилей интенсивности протонов на поздних стадиях развития событий в первой группе.

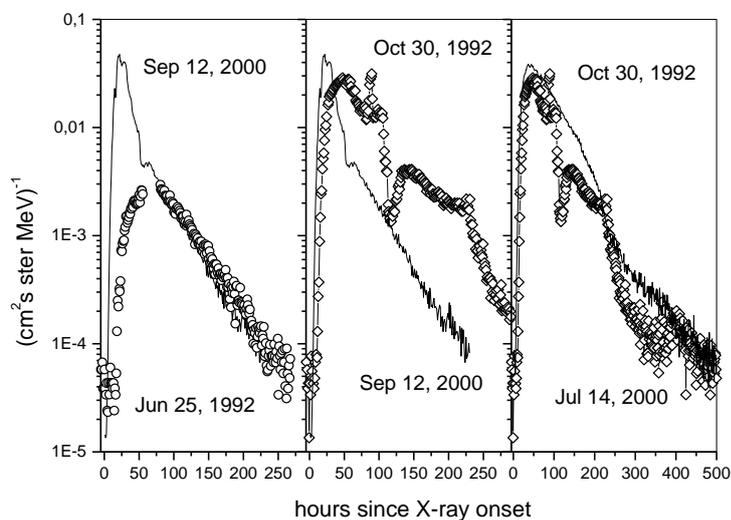


Рис. 14. Сравнение интенсивностей потоков протонов, измеренных детекторами КА Ulysses, в различных событиях на 5 а.е. в плоскости эклиптики (25 июня 1992 г. и 30 октября 1992 г.) и на 2-3 а.е. в полярных широтах гелиосферы (14 июля и 12 сентября 2000 г.). (Struminsky&Heber, 2006)

Далее проанализированы наблюдения эффекта «резервуара» в широком диапазоне широт и долгот в гелиосфере на расстояниях <5 а.е. (**рис. 14**). Сделан вывод о том, что «резервуаром» является область гелиосферы, соединенная с источником силовыми линиями ММП и ограниченная ~ 5 а.е. На таком гелиоцентрическом расстоянии резко уменьшается радиальный коэффициент диффузии, что приводит к захвату частиц СКЛ на расстояниях <5 а.е. (поглощающая граница). Примерно первые 30 ч после солнечной вспышки СКЛ преимущественно распространяются вдоль магнитных силовых линий, соединенных

с источником, а в гелиосфере существуют большие пространственные градиенты СКЛ. В последующие примерно 100 ч поперечная диффузия выравнивает пространственные градиенты между силовыми линиями в широком диапазоне долгот и широт (область «резервуара»); частицы покидают резервуар за счет конвективного выноса потоками солнечного ветра (Struminsky, 2005a). Интенсивность СКЛ в момент начала эффекта «резервуара» отражает полное число частиц, инжектированных в гелиосферу, а скорость спада – эффективность конвективного выноса (Struminsky&Hiber, 2006)

В параграфе 4.3 исследовались вариации интенсивности протонов 200-2000 МэВ по данным KET/Ulysses в 1997-2006 гг., т.е. практически на масштабе времени всего 23-го солнечного цикла. Интенсивность протонов 200-2000 МэВ KET/Ulysses была нормирована к интенсивности протонов 165-500 МэВ GOES в мае-июне 2001 года, когда аппараты были близко расположены в гелиосфере (Струминский, 2007). Такая нормировка (**рис. 15**) показала, что глобальные широтные и радиальные градиенты интенсивности протонов с энергией 200-2000 МэВ на гелиоцентрических расстояниях менее 5 а.е. отсутствовали в 2000-2001 годах, а локальные градиенты играли существенную роль в модуляции космических лучей. Фон ГКЛ является главным фактором, определяющим возможность наблюдения СПС с энергией 200-2000 МэВ на больших гелиоцентрических расстояниях. Только возрастание интенсивности протонов после вспышки 7 сентября 2005 г. превзошло амплитуду 11-летней модуляции фона ГКЛ в 23-м цикле.

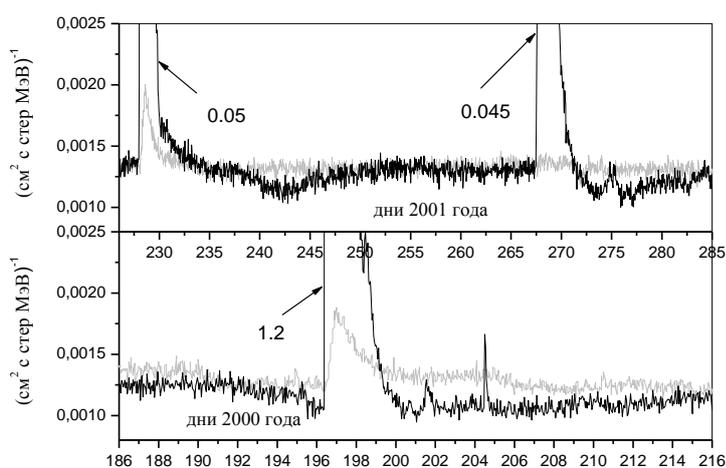


Рис. 15. Сравнение интенсивностей протонов по данным GOES (черная линия) и KET/Ulysses (серая линия) в полярных областях гелиосферы. Максимальные возрастания GOES вне масштаба и показаны цифрами (Струминский, 2007).

Анализ возрастаний интенсивностей солнечных протонов в различных точках трехмерной гелиосферы по данным КА Ulysses показал, что наибольшие потоки

протонов за весь 23-й цикл солнечной активности должны были быть инжектированы в гелиосферу в событии 7 сентября 2005 г. (рис. 16), а не 28 октября 2003 г., как это следует из наблюдений протонов ~ 10 МэВ вблизи Земли, или 20 января 2005 г., соответственно для энергий протонов >100 МэВ (Струминский, 2007; Struminsky et al, 2008). Если частицы СКЛ были ускорены в солнечных вспышках, то и солнечное событие 7 сентября 2005 г. должно быть выделенным из этого ряда. Действительно, 7 сентября 2005 г. по данным ACS SPI были зарегистрированы рекордные характеристики жесткого рентгеновского излучения - максимальная интенсивность и длительность, превосходившие в несколько раз аналогичные величины для других событий 23-го цикла.

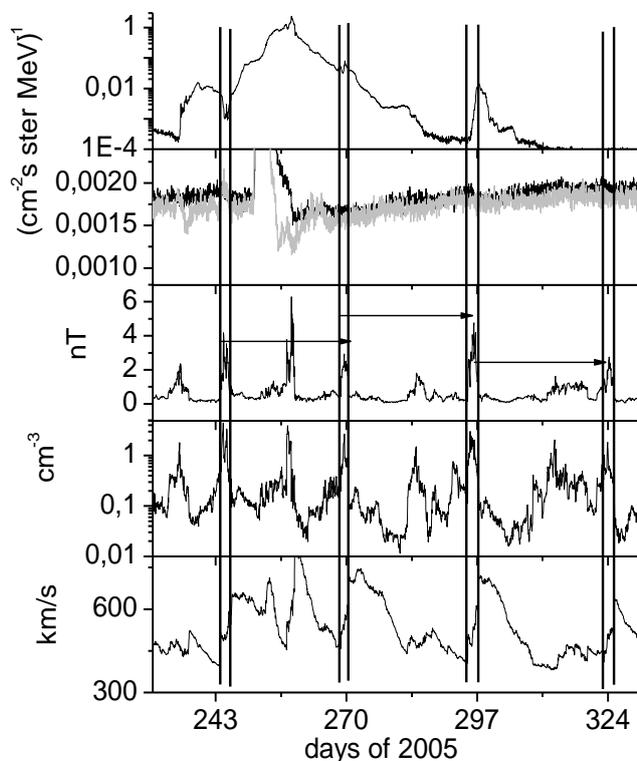


Рис. 16. Наблюдения Ulysses в течение 100 дней 2005 г. (сверху вниз) интенсивности потока протонов 5-25 и 250-2000 МэВ; напряженности магнитного поля, плотности и скорости солнечного ветра. Серая кривая на второй панели - интенсивность протонов 165-500 МэВ (GOES) вблизи Земли. Вертикальные линии - границы коротящихся взаимодействующих потоков.

Если бы ударные волны были бы главным ускорителем, то наибольшие потоки и флюенсы СКЛ должны были бы соответствовать самым сильным возмущениям гелиосферы. Были проанализированы несколько 27-дневных периодов до и после наибольших всплесков солнечной активности в октябре-ноябре 2003 г., январе и сентябре 2005 г. вблизи орбиты Юпитера, по данным КА Ulysses. Анализ показал, что 60 дней после солнечных экстремальных событий в октябре-ноябре 2003 г. были наиболее возмущенным периодом всего 23-го цикла солнечной активности. Большинство энергичных частиц, наблюдавшихся KET/Ulysses в эти

периоды, составляли частицы солнечного происхождения, а взаимодействующие между собой структуры солнечного ветра лишь модулировали фоновые потоки СКЛ (Struminsky et al., 2008).

В **Заключении** обсуждаются полученные результаты.

В **Приложении** представлен исторический обзор наблюдений СКЛ и высокоэнергичного излучения Солнца.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Выявлено, что в результате длительного ускорения и взаимодействия электронов в различных физических условиях в солнечных вспышках балла $>X1$ интенсивность нетеплового излучения не пропорциональна производной по времени мягкого рентгеновского излучения (не наблюдается эффект Нойперта).

2. Предложен новый подход к исследованию солнечных вспышек, который предполагает решение самосогласованных задач ускорения электронов, их взаимодействия в короне и хромосфере Солнца, движения плазмы в активной области. Этот подход основан на обнаруженной зависимости температуры вспышечной плазмы (GOES) от логарифма интенсивности жесткого рентгеновского излучения в предвспышечной и импульсной фазах вспышки 6 декабря 2006 года.

3. Открыт процесс длительной генерации солнечных нейтронов (по наблюдениям НМ Норикура 4 июня 1991 года), который показывает возможность существования солнечного источника протонов в течение нескольких десятков минут после начала вспышки.

4. Установлено, что длительность и интенсивность инжекции протонов ~ 100 МэВ из источника на Солнце определяет первые 15-20 ч развития солнечных протонных событий вблизи Земли, причем возможные изменения длины свободного пробега играют незначительную роль.

5. Найдено, что в энергетическом спектре солнечных протонов, в области энергий 100-1000 МэВ есть излом, связанный с эффективным удержанием частиц корональными и межпланетными структурами магнитного поля. Излом спектра необходимо учитывать при анализе наземных возрастных интенсивности космических лучей.

6. Обнаружено, что временные профили интенсивности солнечных протонов >40 МэВ по данным наблюдений KET/Ulysses совпадают с точностью до множителя

2-3 в течение первых ~60 ч в различных событиях на южных и северных полярных широтах гелиосферы. Это свидетельствует о симметричной инжекции протонов на полярные широты в длительных вспышках.

7. Выявлено, что по мере развития СПС в гелиосфере доминируют различные механизмы распространения солнечных протонов >40 МэВ (продольная и поперечная диффузия, конвекция). Первая константа спада интенсивности солнечных протонов - 10-20 ч, показывает как быстро часть гелиосферы, соединенная с источником, заполняется частицами за счет продольной диффузии, а вторая константа спада ~100 ч отражает скорость выхода частиц из «резервуара» за счет конвекции.

8. Показано, что глобальные радиальные и широтные градиенты протонов КЛ >200 МэВ отсутствовали в гелиосфере на расстояниях < 5 а.е. в 2000-2006 годах, а наблюдавшиеся случаи кратковременного различия интенсивностей протонов на орбите КА Ulysses и вблизи Земли были связаны или с наблюдением СКЛ, или с распространением локальных возмущений солнечного ветра.

Основные результаты работы изложены в 20 публикациях в реферируемых изданиях:

1. Лившиц М.А., Струминский А.Б., Белов А.В. (2001). Роль длительных рентгеновских вспышек на Солнце в формировании возмущений межпланетной среды // *Астрономический вестник*. 2001. Т. 35. № 6. С. 559-565.

2. Аушев В., Антонова В., Белов А., Ерошенко Е., Крякунова О., Струминский А. (2003). Статистический анализ возможных солнечных нейтронных событий по данным алма-атинского высокогорного нейтронного монитора // *Изв. РАН, Сер. Физическая*. 2003. Т. 67. № 4. С. 472-475.

3. Струминский А.Б. (2003а). Свидетельства длительного существования солнечных протонов с энергией >100 МэВ в корональных структурах // *Астрономический журнал*. 2003. Т.47. № 11. С. 916-924.

4. Струминский А. Б. (2003b). Особенности энергетического спектра солнечных протонов в событиях 14 июля 2000 и 4 ноября 2001 // *Изв. РАН, Сер. физическая*. 2003. Т. 67. №10. С. 1427-1430.

5. Хибер Б., Струминский А.Б. (2005). Свойства солнечно-протонных событий на больших гелиоцентрических расстояниях около эклиптики // *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2005. Т. 69. №6. С. 792-795.

6. Струминский А.Б. (2006). Многократное ускорение протонов и их свободное распространение до Земли 20 января 2005 г. // Письма в АЖ. 2006. Т. 32. №10. С. 767-776.
7. Струминский А.Б., Зимовец И.В. (2007). Динамика развития мощных протонных вспышек на Солнце // Письма в АЖ. 2007. Т. 33. № 9. С. 690-697.
8. Струминский А.Б. (2007). Возрастания интенсивности протонов 200-2000 МэВ в 1997-2005 годах по данным KET/ULYSSES // Космические исследования. 2007. Т. 45. № 4. С. 392-396.
9. Струминский А.Б., Зимовец И.В. (2008). Длительное нетепловое излучение солнечных вспышек и эффект Нойперта // Письма в АЖ. 2008. Т. 34. № 10. С. 777-787.
10. Струминский А.Б., Зимовец И.В. (2009). К оценке времени прихода первых релятивистских солнечных протонов на Землю // Изв. РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 3. С. 332-335.
11. Струминский А.Б., Зимовец И.В. (2010). Наблюдения солнечной вспышки 6 декабря 2006: ускорение электронов и нагрев плазмы // Письма в АЖ. 2010. Т. 36. № 6. С. 453-461.
12. Струминский А.Б. (2011) Источник солнечных протонов: температура вспышечной плазмы и моменты инжекции // Изв. РАН. Сер. физическая. 2011. Т. 75. № 6. С. 818-821.
13. Struminsky A., Matsuoka M. and Takakhashi K. (1994). Evidence of Additional Production of High Energy Neutrons During the Solar Flare on 1991 June 4 // ApJ. 1994. V. 429. P. 400-405.
14. Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Oleneva, V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. (2001). What determines the magnitude of Forbush-decreases? // JASR. 2001. V. 27. N. 3. P. 625-630.
15. Struminsky A. (2002). Forbush precursory increase and shock associated particles on October 20, 1989 // Annales Geophysicae. 2002. V. 20. N. 8. P. 1247-1252.
16. Struminsky A., Heber B., Kallenrode M.-B., Muller-Mellin R., Klassen A., Kunow H. (2006) Injection and propagation of solar protons to high heliolatitudes: ULYSSES observations // JASR. 2006. V. 38. N. 3. P. 507-515.
17. Struminsky A. and Heber B. (2006). KET ULYSSES Observations of SEP in and out of the Ecliptic // In Solar Energetic Particles and Plasma. Geophysical Monograph Series. 2006. V. 165. P. 321-334.

18. Zimovets I.V., Gros M., Struminsky A.B. (2009). Evidence of the radio-quiet hard X-ray precursor of the 13 December 2006 solar flare // JASR. 2009. V. 43. N. 4. P. 680-686.

19. Zimovets I.V., Struminsky A.B. (2009). Imaging Observations of Quasi-Periodic Pulsatory Nonthermal Emission in Two-Ribbon Solar Flares // Solar Physics. 2009. V. 258. N. 1. P. 69-88.

20. Zimovets I.V., Struminsky A.B. (2010) Observations of Double-Periodic X-Ray Emission in Interacting Systems of Solar Flare Loops. // Solar Physics. 2010. 10.1007/s11207-010-9518-3.

и в 25 публикациях по материалам конференций:

1. Михайлов М.А. и Струминский А.Б.(2007) Солнечные нейтроны в событии 7 сентября 2005 года // Труды 7-ой БМШ ЭТФ-2006 / Под ред. А.А. Петрухина и М.Х. Хоконова. М: МИФИ. 2007. Т. 2. С. 53-58.

2. Струминский А.Б. (2005) Физика Солнца и гелиосферы // Труды 5-ой БМШ ЭТФ-2004 / Под ред. А.А. Петрухина и М.Х. Хоконова. Нальчик: КБГУ. 2005. Т. 2. С. 4-16.

3. Струминский А.Б. (2007). Распространение космических лучей в трехмерной гелиосфере // Труды 8-ой БМШ ЭТФ-2006 / Под ред. А.А. Петрухина и М.Х. Хоконова. М: МИФИ. 2008. Т. 1. С. 28-43.

4. Струминский А.Б. (2008) Электромагнитная диагностика солнечных вспышек // Труды 8-ой БМШ ЭТФ / Под ред. А.А. Петрухина и М.Х. Хоконова. М: МИФИ. 2008. Т. 1. С. 53-69.

5. Струминский А.Б. (2010а). Источник солнечных протонов: температура вспышечной плазмы и моменты инжекции. CD-rom. ВККЛ-2010. М: НИИ ЯФ МГУ, 2010.

6. Струминский А.Б. (2010b) Наблюдения радиоизлучения на частоте 245 МГц как индикатор нового режима ускорения электронов и нагрева плазмы // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца, солнечная и солнечно-земная физика-2010 / Под ред. А.В. Степанова и Ю.А. Наговицина, СПб, ГАО РАН, 2010. С. 425-428.

7. Aushev V., Antonova, V., Belov A., Eroshenko E., Kryakunova O., Struminsky A. (1999). Search for Solar Neutron Events in Alma-Ata NM Data // 26th ICRC, Salt Lake City, Utah, USA, 1999. V. 6. P. 50-53.

8. Struminsky A. and Kohno T. (1993). Peculiarities of Solar Proton Spectra in Stratosphere and Geostationary Orbit on 2-3 November 1992 // 23rd ICRC, Calgary, Canada, 1993. V. 3. P. 5-9.
9. Struminsky A., M. Matsuoka and Takakhashi K. (1994). Evidence of Additional Production of High Energy Neutrons During the Solar Flare on 1991 June 4 // Proc. of Kofu Symposium. Kofu, Japan. NRO Report. 1994. N. 360. P. 405-409.
10. Belov A., Chertok I., Struminsky A. (1995) Time Evolution of Solar Proton Energetic Spectra at the Earth orbit and Possibility of Multi-Step Particle Acceleration // 24th ICRC. Rome, Italy. 1995. V. 4. P. 127-130.
11. Struminsky A., Belov A. (1997) Neutron Monitor Sensitivity to Primary Protons below 3 GV Derived from Data of Ground Level Events // 25th ICRC. Durban, South Africa. 1997. V.1. P. 201-204.
12. Struminsky A. (2001a) Forbush decrease on October 20-22, 1989: solar protons, interplanetary and magnetospheric variations // 27th ICRC. Hamburg, Germany. 2001. V. 9. P. 3558-3561.
13. Struminsky A. and Lal M. (2001b) Magnetospheric currents and variations of cutoff rigidities on October 20, 1989 // 27th ICRC. Hamburg, Germany. 2001. V. 10. P. 4053-4056.
14. Struminsky A. (2003a). Interacting and Escaping > 100 MeV Solar Protons as observed on 11 and 15 June 1991 // 28th ICRC. Tsukuba, Japan. 2003. V. 6. P. 3515-3518.
15. Struminsky A. (2003b) Prolonged Release of > 100 MeV Solar Protons in the GLE Events of 1997-2002 // 28th ICRC. Tsukuba, Japan, 2003. V. 6. P. 3317-3320.
16. Struminsky A. (2003c) On Accuracy of Solar Cosmic Ray Anisotropy and Intensity Deduced from NM Data // 28th ICRC. Tsukuba, Japan, 2003. V. 6. P. 3419-3422.
17. Struminsky A. (2005a). Three modes of particle propagation in the heliosphere // 29th ICRC. Pune, India, 2005. CD-rom.
18. Struminsky A. (2005b). On Possibility of Prolonged Two Step Production of High Energy Neutrons during the Solar Flare on 28 October 2003 // 29th ICRC. Pune, India, 2005. CD-rom.
19. Struminsky A., (2005c). Variations of solar proton spectrum during the ground level enhancement of 2005 January 20 // 29th ICRC. Pune, India, 2005. CD-rom.

20. Struminsky A. (2006). Enhancements of 200-2000 MeV proton intensity observed by KET/ULYSSES in 1997-2005 // Proceedings 20th ECRS. Lisbon, Portugal, 2006, CD-rom.
21. Struminsky A., B. Heber, R. Gomez-Herrero, A. Klassen (2008). Modulation of Proton Fluxes at ~5AU during the Largest SEP Events of 2005 // 30th ICRC. Merida, Mexico. 2008. N 1. P. 131-134.
22. Heber B., Struminsky A., I. Zimovets, and et al. (2008). Observations of the December 2006 Particle Events at High Latitudes with the KET aboard ULYSSES // 30th ICRC. Merida, Mexico, 2008. N 1. P. 217-220.
23. Struminsky A. and Zimovets I. (2008). Time Scales of Hard X-ray and Radio Emissions of Large Proton Flares. // 30th ICRC. Merida, Mexico, 2008. N 1. P. 7-10.
24. Struminsky A. and I. Zimovets (2009). On estimates of first solar proton arrival // In Proc. 21st ECRS / Eds. P. Kyraly, K. Kudela, M. Stehlik, A.W. Wolfendale, printed by VIENALA s.r.o., Koshice, Slovakia, 2009. P. 237-241.
25. Struminsky A., Zimovets I., Heber B. and Klassen A. (2009) The role of large scale solar magnetic field for distribution of SEP in the 3D heliosphere // 31st ICRC. Lodz, Poland, 2009. CD-rom.
26. Struminsky A. (2011). Relative Timing of Electron Acceleration and Proton Release in X-class Solar Events // 32nd ICRC. Beijing, China, 2011. CD-rom. Paper 0132.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А., Свиржевская А.К. (2008). Приход первых релятивистских протонов и условия в солнечной короне // Геомагнетизм и Аэрномия. 2008. Т. 48. № 4. С. 425.
- Любимов Г.П. (2002). Радиационные пояса Солнца // Космические Исследования. 2002. Т. 40. № 6. С. 565.
- Allafort A., et al. (2011). Long-lived solar γ -ray emission during 2011 March 7 to 8 detected by Fermi-LAT // 32nd ICRC. Beijing, China, 2011. Paper 0683.
- Cane H. et al. (2010). A study of solar energetic particle events of 1997–2006: Their composition and associations // JGR. 2010. V. 115. No A08101.10.1029/2009JA014848.
- Cliver E. (2009). History of research on solar energetic particle (SEP) events: the evolving paradigm // In Proc. IAU Symposium, 2009. V. 257. P. 401.

Dalla S. et al. (2003a). Properties of high heliolatitude solar energetic particle events and constraints on models of acceleration and propagation // *Geophys. Res. L.* 2003. V. 30. N. 19. P. 8035.

.Dalla S., et al. (2003b). Delay in solar energetic particle onsets at high heliographic latitudes // *Ann. Geophysicae.* 2003. V. 21. P. 1267.

Decker R.B., et al. (1999). Solar Energetic Particles from the April 1998 Activity: Observations from 1 to 72 AU // 26th ICRC. Uta, USA, 1999. V. 6. P. 328.

Feldman U. (1990). The beam-driven chromospheric evaporation model of solar flares - A model not supported by observations from nonimpulsive large flares // *ApJ.* 1990. V. 364. P. 322.

Frost K. and Dennis B. (1971). Evidence from Hard X-Rays for Two-Stage Particle Acceleration in a Solar Flare // *ApJ.* 1971. V. 165. P. 655.

Gosling J.T.(1993). The solar flare myth // *JGR.* 1993. V. 98. P. 18937.

Gros, M.; et al. (2004). INTEGRAL/SPI Observation of the 2003 Oct 28 Solar Flare // *In Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop.* ESA SP-552.

Hamilton D.C. (1981). Dynamics of solar cosmic ray events - Processes at large heliocentric distances /much greater than 1 AU // *JASR.* 1981. V. 1. P. 25.

Kahler S. et al. (1980). Primary energy release // *In Solar Flares / Edited by P. A. Sturrock,* Colorado associated University Press, Boulder, Colorado, 1980. P. 83.

Kallenrode M.B. (2003). Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events // *J. of Physics G: Nuclear and Particle Physics.* 2003. V. 29. N. 5. P. 965.

Klecker B. et al. (2006). Energetic Particle Observations // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 123. P. 217-250.

Klein L. and Trottet G. (2001). The Origin of Solar Energetic Particle Events: Coronal Acceleration versus Shock Wave Acceleration // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 95. P. 215.

Lario D. et al. (2004a). Low-energy particle response to CMEs during the Ulysses solar maximum northern polar passage // *JGR.* 2004. V. 109. P. A01107.

Lario D. et al. (2004b). Heliospheric energetic particle observations by the Cassini spacecraft: Correlation with 1 AU observations // *JGR.* 2004. V. 109. P. A09S02.

Lario D.and Decker R.B. (2001). Re-examination of the October 20, 1989 ESP event // 27th ICRC, Hamburg, Germany, 2001. CD-rom.

Lario D. and Decker R.B. (2002). The energetic storm particle event of October 20, 1989 // GRL. 2002. V. 29. N. 10. P. 1393.

Neupert W.M. (1968). Comparison of Solar X-Ray Line Emission with Microwave Emission during Flares // ApJ. 1968. V. 153. P. L59.

McKibben R.B. et al. (2003). Ulysses COSPIN observations of cosmic rays and solar energetic particles from the South Pole to the North Pole of the Sun during solar maximum // Ann. Geophysicae. 2003. V. 21. P. 1217.

Murphy R. and Share G. (1993). OSSE Observations of the 4 June 1991 Solar Flare // 23rd ICRC. Calgary, Canada, 1993. V. 3. P. 99.

Palmer I.D. (1982). Transport coefficients of low-energy cosmic rays in interplanetary space // Rev. of Geophys. and Space Physics. 1982. V. 20. P. 335.

Ramaty, R.; Mandzhavidze, N. et al. (1993). Acceleration in solar flares: Interacting particles versus interplanetary particles // JASR. 1993. V. 13. No 9. P. 275.

Ramaty R. and Mandzhavidze N. (1994). Theoretical models for high-energy solar flare emissions // In High-energy solar phenomena-A new era of spacecraft measurements. AIP Conference Proceedings. 1994. V. 294. P. 26.

Reames D.V. (2009). Solar Energetic-Particle Release Times in Historic Ground-Level Events // ApJ. 2009. V. 706. P. 844.

Reames D.V. (1999). Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere // Space Sci. Rev. 1999. V. 90. N 3. P. 413.

Reams D.V. et al. (1997). Spatial and Temporal Invariance in the Spectra of Energetic Particles in Gradual Solar Events // ApJ. V. 491. P. 414.

Ryan J.M. (2000). Long-Duration Solar Gamma-Ray Flares // Space Sci. Rev. 2000. V. 93. P. 581.

Simpson A. et al. (1992). The ULYSSES Cosmic Ray and Solar Particle Investigation // A&A Suppl. Ser. 1992. V. 92. P. 365.

Takakhashi K. et al. (1991) Observation of Solar Neutrons by Mt. Norikura Neutron Monitor During a Period of Solar Cycle 22 // 22nd ICRC. Dublin, Ireland, 1991. V. 3. P. 37.

Tylka A. et al. (2005) Shock Geometry, Seed Populations, and the Origin of Variable Elemental Composition at High Energies in Large Gradual Solar Particle Events // ApJ. 2005. V. 625. P. 474.

Zhang M. et al. (2003) Perpendicular transport of solar energetic particles in Heliospheric magnetic fields // ApJ. 2003. V. 595. P. 493.

Ротап rint ИКИ РАН

055(02)2

117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 12.10.2011

Заказ 2260

Формат 70x108/32

Тираж 100

2,0 уч.-изд.л..