

---

СТРУМИНСКИЙ Алексей Борисович

ДИНАМИКА И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ

(Специальность 01.03.03 – Физика Солнца)

Автореферат  
Диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва  
201\*

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук

Предполагаемы оппоненты

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

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

Степанов А.В. д.ф.-м.н., проф., ГАО РАН

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

Защита состоится \*\*/\*\*/\*\*\*\* в \*\* часов 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

Диссертация содержит анализ пространственно-временных особенностей распространения солнечных космических лучей (СКЛ) в гелиосфере и их сравнение с динамикой гамма, рентгеновского и радиоизлучения солнечных вспышек. Использовались данные, полученные на космических аппаратах в различных точках гелиосферы (гамма и рентгеновского излучения Солнца, солнечных протонов и электронов, параметров солнечного ветра), а также результаты наземных наблюдений (поток солнечного протонов и нейтронов, радиоизлучения Солнца). Показано, что динамика и пространственное распределение солнечных протонов с энергией более 40 МэВ на расстоянии  $<5$  а.е. в какой-либо точке гелиосферы после солнечной вспышки определяются первые 30 часов свойствами источника на Солнце, а далее - процессами распространения. Поперечная диффузия выравнивает пространственные градиенты СКЛ, образовавшиеся в начале события. За счет конвекции частицы СКЛ выносятся потоком солнечного ветра из равномерно заполненной области, ограниченной на  $\sim 5$  а.е. тангенциальными силовыми линиями межпланетного магнитного поля. Диссертация основана на работах, выполненных автором с 1993 по 2011 год, и охватывает наблюдательный материал 22-го и 23-го циклов солнечной активности

## 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 мы можем 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 называют «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 длительности жесткого (нетеплового) и мягкого рентгеновского (теплового) излучения различаются примерно на порядок и составляют 1-10 мин и 10-100 мин, соответственно. Здесь меньшие величины соответствуют «импульсным» солнечным вспышкам, а большие – «длительным».

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, вызвавшие 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 то, 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 их привязку друг к другу. Корональные и межпланетные ударные волны, области взаимодействия высокоскоростных потоков солнечного ветра являются другими возможными ускорителями заряженных частиц в гелиосфере (Reams, 1999). Относительный вклад того или иного ускорительного механизма в настоящее время неизвестен.

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 – 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 гамма-линий 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, которая является исторически более старой («старая парадигма») основывается на анализе высокоэнергичной ( $>500$  МэВ) части спектра солнечных протонов, в основном по данным сети нейтронных мониторов (НМ), 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 гамма 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 (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. Аккуратная сшивка данных спутниковых детекторов и нейтронных мониторов необходима для исследования динамики спектра солнечных протонов в течение всего события и определения вклада того или иного механизма ускорения в наблюдаемые потоки СКЛ.

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) было исследование потоков СКЛ в трехмерной гелиосфере, роли коронального магнитного поля при распространении СКЛ и вклада различных источников (ускорителей) в наблюдаемые потоки (Simpson et al., 1992). 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 годах, а на гелиоцентрических расстояниях  $\sim 5$  а.е. в плоскости эклиптики в 1992, 1997-1998, 2003 и 2005 годах. 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 эффективном и специфическом транспорте 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 вышперечисленного 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 высокоэнергичных частиц в межпланетном пространстве;

- Детальное исследование свойств потоков СКЛ в области энергий порядка сотен МэВ/нуклон - пограничной между характерной энергией протонов, измеряемой детекторами на спутниках и нейтронными мониторами;
- 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 изучаются процессы взаимодействия высокоэнергичных частиц в короне и хромосфере Солнца и их распространения 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-ом и 23-ем 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 годов 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 гамма 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 модуляции и пространственного распределения в 1997-2007 годах 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 года, который свидетельствует о взаимодействии и ускорении протонов  $>100$  МэВ в атмосфере в течение 60 мин после начала вспышки;

- открыть идентичность временных профилей интенсивности солнечных протонов  $\sim 40-100$  МэВ в северных и южных полярных областях гелиосферы первые 30 часов развития событий, которая свидетельствует о симметричной инжекции и близких параметрах распространения протонов до КА Ulysses после длительных вспышек;

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

**Научная и практическая ценность диссертационной работы** определяется комплексным подходом к проблеме происхождения СКЛ, в котором с единой точки зрения рассматривается задача об их происхождении и распространении. Научная

ценность работы состоит в обнаружении ранее неизвестных наблюдательных фактов, которые изменяют сложившиеся представления об энергетике солнечных вспышек и ускорении в них частиц. 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 минут) и непрерывные спектральные наблюдения рентгеновского и гамма излучения с возможностью локализации источников в каждом эпизоде выделения энергии, в частности, слабого коронального источника на фоне более интенсивного источника 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, которые не могут быть зарегистрированы работающими в настоящее время детекторами.

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», «SolarOrbiter» 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 ИЮ2007 в Бад-Хоннефе (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), 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; Пулково, 2008, 2009, 2010);

на конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва 2009, 2010);

а также 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 25 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 270 страниц (включая 110 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 300 наименований).

**Во введении** сформулирована проблематика, актуальность и цели исследований солнечных космических лучей, приведен обзор современных представлений об ускорении, взаимодействии высокоэнергичных заряженных частиц на Солнце, а также их ускорении и распространении в межпланетном пространстве (гелиосфере).

По длительности мягкого (теплого) рентгеновского 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  $H_{\alpha}$  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 гамма диапазоны ЭМ излучения. Линейчатое  $\gamma$ -излучение ядер (единицы МэВ), наблюдаемое на фоне непрерывного  $\gamma$ -излучения релятивистских электронов, позволяет судить о протонах с энергией порядка 30 МэВ, взаимодействующих в атмосфере Солнца, а  $\gamma$ -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 происходит 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 выполняется 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 года гамма-излучения солнечных вспышек с помощью чувствительных детекторов на борту космических обсерваторий ComptonGRO и Гамма. До июня 1991 года длительность  $\gamma$ -излучения, зарегистрированная в одном событии, не превышала  $\sim 1000$  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). К сожалению наблюдения 1991 года так и остались неподтвержденными в других событиях до настоящего времени.

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 малости 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 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 лучше, чем несколько 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 сравниваются с различными временными профилями ЭМ излучения предполагаемой родительской солнечной вспышки и условным моментом старта КВМ от поверхности Солнца. Момент старта КВМ вычисляется в предположении 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 малости 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 годах 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 инжекции из солнечного источника на высокие широты был 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) на *Cassini* (4-7 а.е. плоскость эклиптики) и вблизи Земли в 2000-2001 не подтвердили этот результат (Lario et al., 2004b), т.к. 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 часов, наблюдались значительные пространственные градиенты СКЛ. Во время второй фазы пространственные градиенты были малы или отсутствовали, а характерное время спада составляло более 40 часов. 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 КВМ. Однако последняя интерпретация не согласуется с наблюдениями на *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 он не может создавать и влиять на сами объекты исследований. В каждом солнечном цикле существует 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 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 солнечных вспышек.

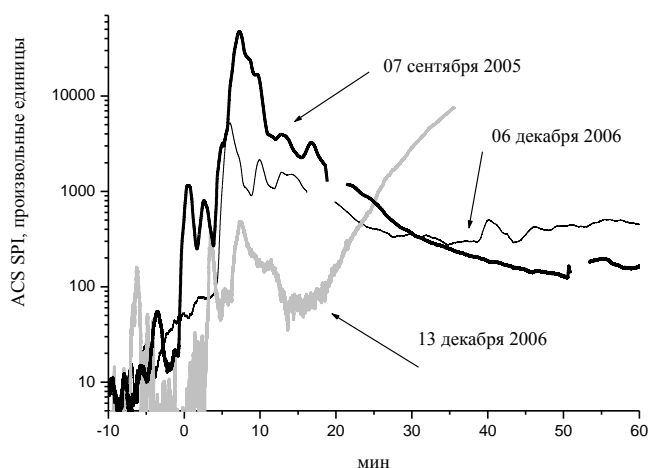
**В первой главе** проанализированы результаты наблюдений жесткого рентгеновского излучения Солнца с помощью антисовпадатальной защиты спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (ACS SPI), которые сравниваются с данными других КА и наземных установок в различных диапазонах электромагнитного излучения.

**В параграфе 1.1** рассмотрены методические вопросы **первой главы**. **В разделе 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 гамма-квантам с пороговой энергией регистрации 80 кэВ. В момент мощных солнечных рентгеновских вспышек и до прихода СКЛ ACS SPI преимущественно регистрирует солнечные  $\gamma$ -кванты с энергией  $>150$  кэВ, впервые данные ACS SPI были применены для исследования солнечных вспышек в работе (Gros et al., 2004). К сожалению, не известны функции отклика детектора ACS SPI, также он не является спектрографом, однако большая масса детектора и сильно вытянутая орбита КА ИНТЕГРАЛ (период обращения 72 часа) дают ему преимущества по сравнению с другими детекторами для наблюдения солнечного жесткого рентгеновского и гамма-излучения. Данные ACS SPI обладают высокой статистической точностью и свободны от влияния радиационных поясов длительное время. Временные профили темпа счета ACS SPI в некоторых характерных событиях приведены на **рис. 1**.

Сравнение темпов счета ACS SPI и детекторов RHESSI и СОНГ/КОРОНАС-Ф в различных энергетических каналах в те моменты времени, когда проводились одновременные измерения солнечного рентгеновского и гамма 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 и Зимовец, 2008, 2010). Чувствительность детекторов RHESSI явно недостаточна для исследования начала и конца развития длительных солнечных вспышек при энергиях гамма-квантов  $>80$  кэВ.

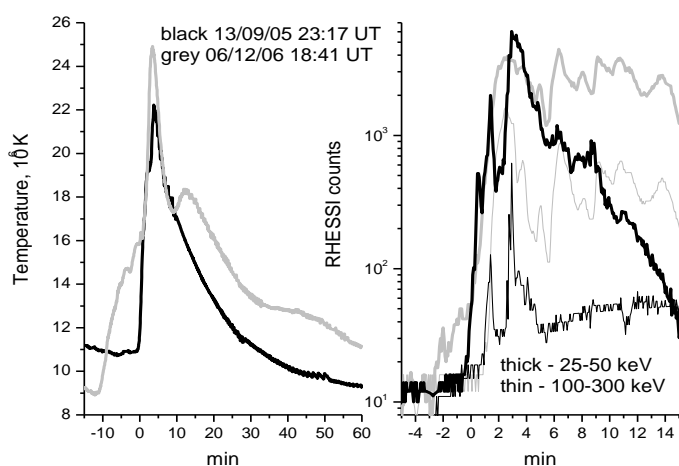
Орбиты КА RHESSI (низкая экваториальная), КОРОНАС-Ф (низкая полярная) и ИНТЕГРАЛа диктуют свои условия наблюдения солнечных вспышек. Как на низких круговых, так и на вытянутых эллиптических орбитах могут быть пропущены целые солнечные события или важные эпизоды их развития из-за влияния радиационных 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. Данных ACS SPI используются при исследовании солнечных протонных событий в **Главе 3**.



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

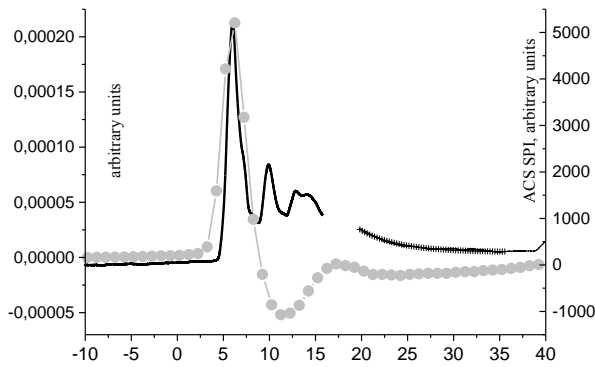
**В разделе 1.1.2** обсуждается отбор событий для исследования и обосновывается возможность их сравнения между собой. Было рассмотрено более 100 событий рентгеновского балла  $>X1$ , произошедших в 1989-1992, 1997-2006 годах, для которых были вычислены и построены временные профили эффективной температуры. Эффективная температура  $T$  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 в 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 года и длительного события 6 декабря 2006 года, 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), следовательно, и 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 года (черные кривые) и длительного 6 декабря 2006 года (серые кривые). Правая панель темп счета RHESSI 25-50 кэВ (толстые кривые) и 100-300 кэВ (тонкие кривые).

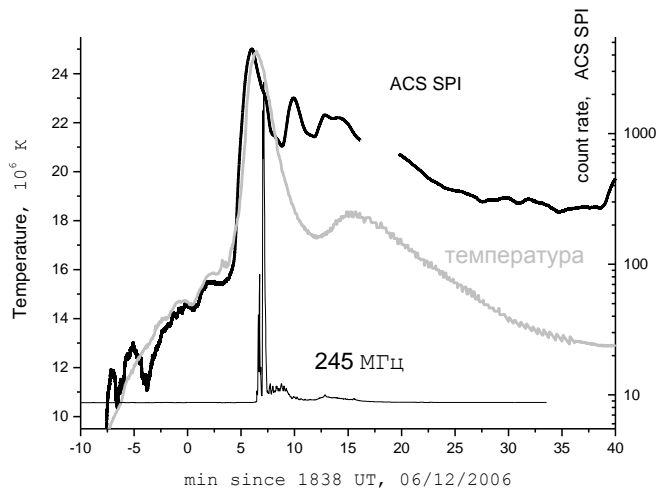
**В параграфе 1.2** проверяется выполнение эффекта Нойперта в некоторых импульсных и длительных вспышках. Производная по времени интенсивности мягкого рентгеновского излучения GOES сравнивалась с наблюдаемыми потоками жесткого рентгеновского различной энергии (ACS SPI и RHESSI) и микроволнового излучения. 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 и 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. высоком корональном источнике высокоэнергичных частиц ( $>10^5$  км,  $10^9$  см $^{-3}$ ).



**Рис. 3.** Отсутствие эффекта Нойперта на фазе спада вспышки 6 декабря 2006. Темп счета ACS SPI – черная кривая, производная по времени мягкого рентгеновского излучения GOES – серые кружки. (Струминский и Зимовец, 2008).

**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 разделе 1.3.1 рассмотрены наблюдения солнечной вспышки 6 декабря 2006 года, в которой впервые удалось измерить жесткое рентгеновское излучение  $>150$  кэВ в предвспышечной фазе (Струминский и 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).

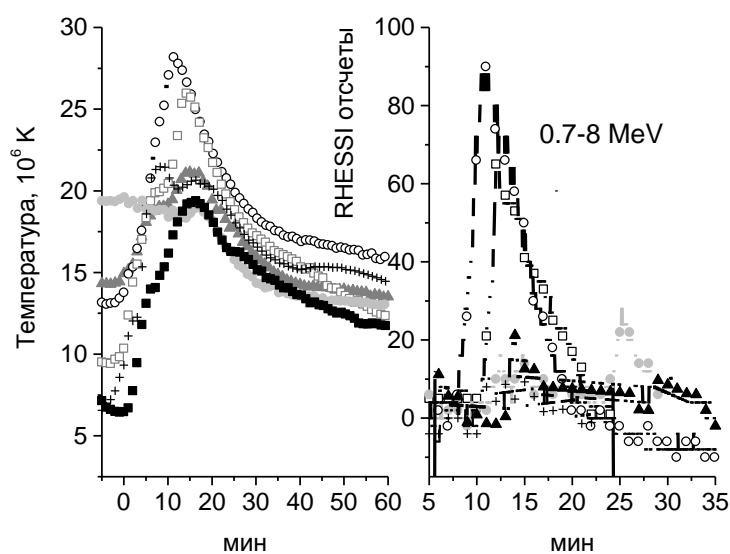


**Рис. 4.** Временные профили температуры вспышечной плазмы (серая кривая, левая шкала), темпа счета ACS SPI (черная кривая, правая шкала) и интенсивности радиоизлучения 245 МГц (вне масштаба по вертикали) (Струминский и Зимовец, 2010).

Импульсные события, рассмотренные в **разделе 1.3.1.**, характеризуются отсутствием предвспышечной фазы, развитием нетепловых явлений в течение менее 10 мин, и быстрым спадом эффективной температуры с характерным временем  $\sim 20$  мин (**рис. 2**). На фазе роста наблюдается 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 **раздел 1.3.2** обсуждаются длительные события, которые характеризуются развитой предвспышечной фазой и фазой спада температуры длиннее, 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 (**рис. 1-2**). Высказано предположение, что длительные события являются цепочкой перекрывающихся импульсных, которые инициируются при последовательной эрупции нескольких волокон в одной активной области (Струминский, 2010).

В мощных протонных вспышках 2003-2006 годов были получены свидетельства ускорения частиц на Солнце в нескольких эпизодах порядка 1-2 мин и суммарной длительностью более 15 мин. В работе (Струминский и Зимовец, 2007) были рассмотрены импульсные фазы трех мощнейших вспышек 23 цикла (28 октября 2003 г., 20 января и 7 сентября 2005 г.), которые длились  $\sim 15$  минут 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 года была обнаружена сходная структура временных профилей нетеплового излучения (Struminsky&Zimovets, 2007), где, как и в событиях 2003 и 2005 годов. 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 & Struminsky, 2009, Зимовец, 2010).



**Рис. 5.** Временные профили температуры вспышечной плазмы GOES (левая панель) и интенсивности гамма-излучения RHESSI (правая панель) черные квадраты-14.07.00; открытые квадраты-02.10.03; серые треугольники-17.01.05; серые кружки-19.01.05; открытые кружки-20.01.05; черные треугольники-13.12.06. (Струминский, 2010).

Рассмотрение случаев наблюдения солнечного гамма-излучения  $>0.7$  МэВ (RHESSI) в шести протонных вспышках относительно нулевого времени, выбранного с учетом подобия временных профилей температуры, показало (**рис. 5**), что ускорение электронов с наиболее жестким спектром происходило в конце событий на фазе спада температуры.

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 взрывному расширению плазмы, которое сопровождается ее эффективным охлаждением, поэтому значительные потоки ускоряющихся электронов уже не влияют на температуру вспышечной плазмы.

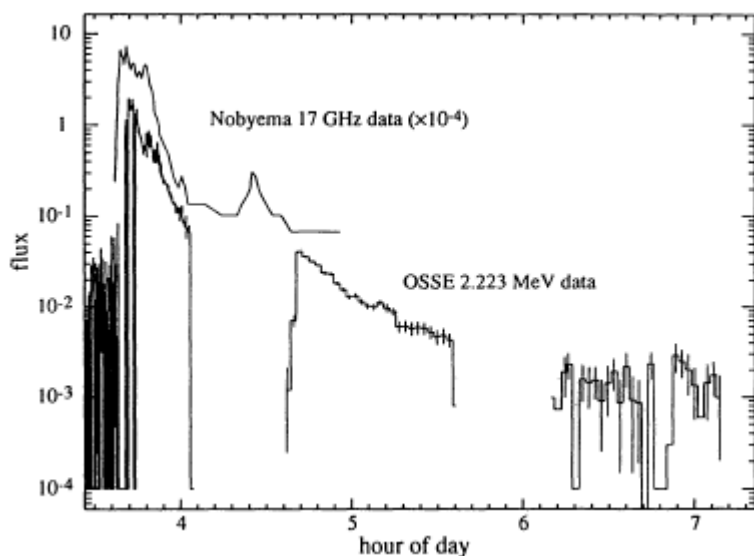
Исследование высокого ( $\sim 10^5$  км) коронального источника ускоренных частиц, а также перестройки конфигурации магнитного поля после взрыва, представляется чрезвычайно важным в связи с проблемой происхождения солнечных протонов и электронов, регистрируемых в межпланетном пространстве после длительных вспышек. Для этого необходимо создание нового поколения телескопов жесткого рентгеновского и гамма 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 годах.

**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 НМ, расположенными в местах с высокой жесткостью геомагнитного обрезания космических лучей (минимальный фон ГКЛ), вблизи полудня местного времени (минимальная толщина 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 разделе 2.3.1** рассматривается событие 4 июня 1991 года (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 Комптона прибором OSSE (Oriented Spectroscopic Scintillation Experiment) гамма-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 гамма-линий 2.223 и 4.44 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 минут 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 гамма-линии 2.223 МэВ по данным OSSE/CGRO. Во втором эпизоде, когда CGRO находилась на ночной стороне Земли, временной профиль источника подбирался из условия наилучшего согласия между расчетным и наблюдаемым временными профилями НМ. 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. Ранее нейтронные события, зарегистрированные мировой сетью НМ – 3 июля 1982 г и 24 мая 1990 г, не противоречили модели с импульсной инъекцией и с постоянным спектром.

В разделах 2.3.2 и 2.3.3 представлены два других примера длительной генерации солнечных нейтронов во время мощных вспышек 28 октября 2003 года и 7 сентября 2005 года, которые сопровождалась жестким рентгеновским и гамма излучением. Возрастания темпа счета нейтронных мониторов Цумеб (Tsumeb) и Чакалтая (Chacaltaya) в момент этих вспышек были интерпретированы, как вызванные приходом солнечных нейтронов.



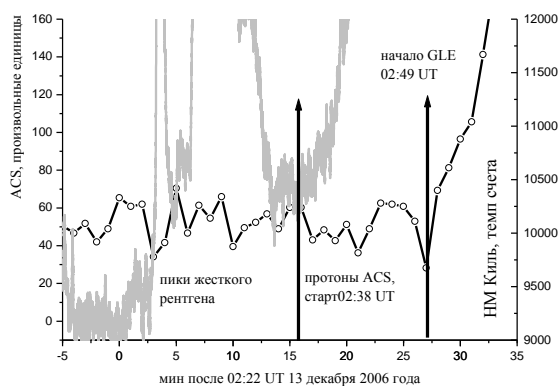
Показано, что начальная фаза возрастания соответствует выходу нейтронов с поверхности Солнца с интенсивностью пропорциональной темпу счета ACS SPI. Однако при этом не удается описать конечную стадию наблюдавшихся возрастаний - второй максимум 28 октября 2003 года и длительный спад 7 сентября 2005 года (Struminsky, 2005b; Михайлов и Струминский, 2007). Предположение об изменении в конце событий спектра нейтронов и коэффициента пропорциональности функции источника темпу 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 года практически совпадает со временем UT солнечных вспышек 28 октября 2003 и 7 сентября 2005 года соответственно. Если бы в этих событиях 2006 года были бы генерированы солнечные нейтроны, то благоприятными местами для наземной регистрации нейтронов были бы НМ Цумб и Чакалтая. Если считать, что не изменилась эффективность регистрации нейтронов по сравнению с событиями 28 октября 2003 года и 7 сентября 2005 года, то ожидаемый отклик НМ оказывается меньше статистических погрешностей. Действительно, в событиях 5 и 6 декабря 2006 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, следовательно, и протонов может работать несколько десятков минут после начала вспышки.

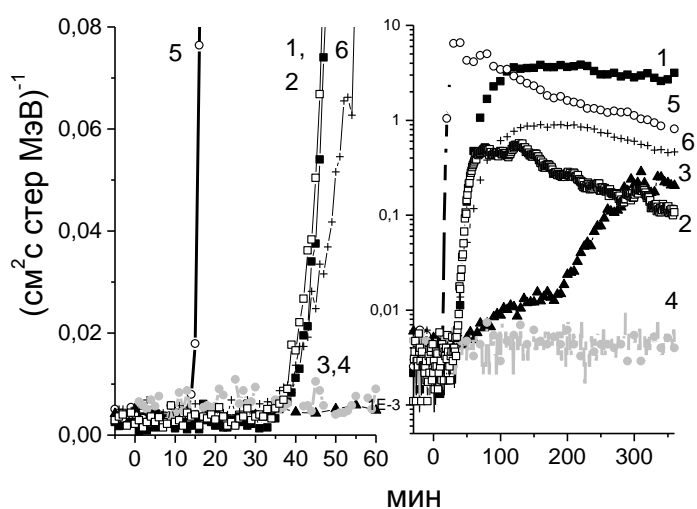
В **третьей главе** рассматривается связь потоков СКЛ в 1989-2006 годах с солнечным источником в различных моделях их распространения в гелиосфере. Основное внимание уделяется диапазону энергий порядка 100 МэВ, соответствующему верхнему энергетическому диапазону детектора на спутниках GOES и нижнему энергетическому пределу нейтронных мониторов (атмосферный порог, 430 МэВ).

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. Неопределенности в определении момента прихода солнечных протонов по данным НМ связаны с собственным фоном детектора, вариациями порога жесткости геомагнитного обрезания, направления конуса приема. Нами 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 (Struminsky, 2011) и 13 декабря 2006 (Струминский и Зимовец, 2009; Struminsky&Zimovets, 2009). В этих событиях задержка прихода релятивистских протонов на Землю на 15 мин относительно вспышки жесткого рентгеновского излучения считалась значимой и свидетельствовала об ускорении протонов значительно позднее. Возрастание темпа счета ACS SPI, вызванное приходом релятивистских протонов, наблюдалось раньше и соответствовало их ускорению в момент вспышки (**рис. 7**). Этот наблюдательный 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 прибором ACS SPI (серая кривая) по сравнению с НМ Киль (черные кружки). (Струминский и Зимовец, 2009).

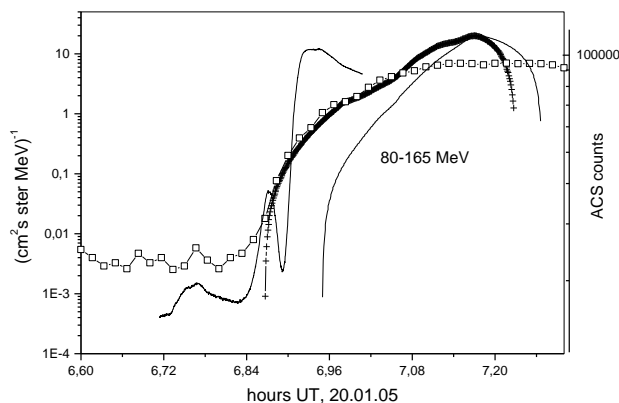
Дисперсия по скоростям при распространении частиц различных энергий затрудняет восстановление функции инжекции в межпланетное пространство по данным интегральных детекторов. Так как длительность промежутка времени между соседними эпизодами ускорения в импульсной фазе составляет 1-2 минуты, то в большинстве 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 на масштабе более 10 мин (Belov et al., 1995). Первые оценки показали, что после длительных солнечных вспышек с ярко выраженной пост-эруптивной 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 наблюдаемых вариаций спектра в событиях 20 января 2005 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, 2010).

Учет подобия временных профилей температуры в длительных вспышках (**параграф 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 минуте, что не противоречит их ускорению одновременно с электронами во вспышке и выходу в межпланетное пространство на фазе спада температуры (примерно на 25 минуте) в момент отрыва КВМ (Струминский, 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 является следствием уникальных условий распространения, сложившихся в результате предшествующих солнечных вспышек.

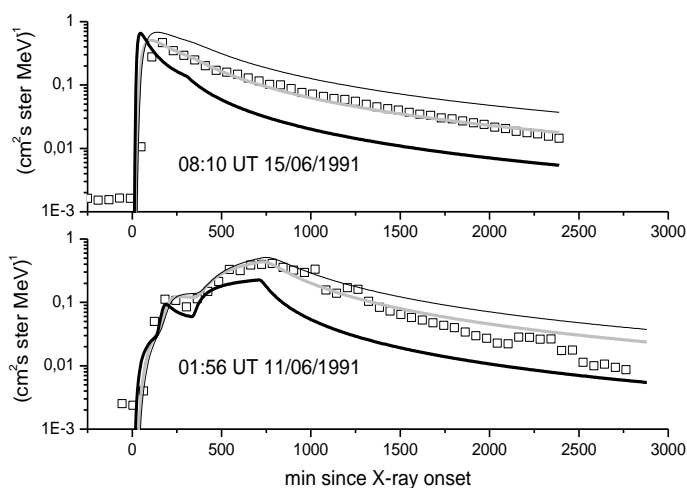
**Параграф 3.2** посвящен исследованию выдающегося солнечного протонного события 20 января 2005 года, в котором солнечные протоны с энергией более 80 МэВ распространялись без рассеяния до Земли и временные профили их интенсивности определялись свойствами источника на Солнце примерно первые 30 мин после 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 наблюдениями гамма-излучения от распада пи-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 (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 солнечно-протонные события 1989-2006 годов, сопровождавшиеся наземными возрастаниями интенсивности космических лучей. Показано, что интенсивность солнечных протонов, измеренная в канале 84-165 МэВ на спутниках серии GOES во время первых 15-20 часов развития СПС, может быть аппроксимирована диффузионной моделью распространения, причем инжекция протонов от 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 гамма-квантов от  $\pi^0$ -распада во вспышках 11 и 15 июня 1991 года 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 года получено качественное, а для 15 июня 1991 года – количественное согласие с числом протонов необходимых для генерации наблюдаемого гамма 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 гамма-излучение. Однако эти наблюдения либо не проводились вовсе, либо проводились инструментами с высоким порогом регистрации.



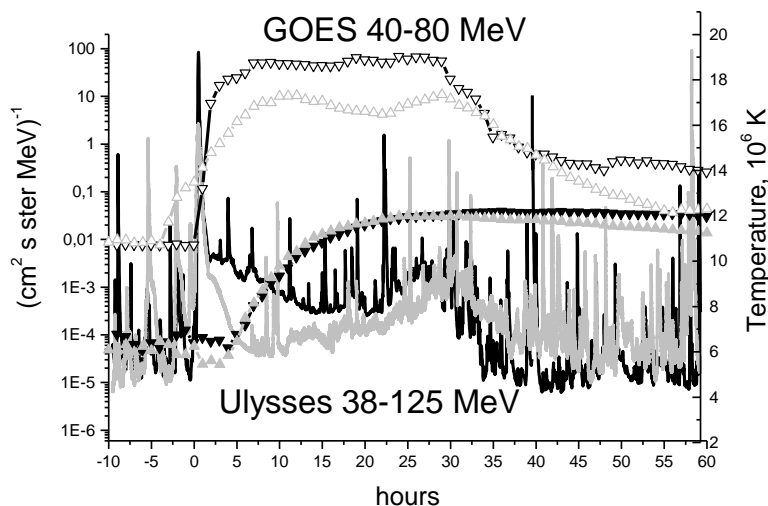
**Рис. 10.** Интенсивности протонов 11 и 15 июня 1991 в диффузионной модели с длительной инжекцией при различных длинах свободного пробега (серая линия – 0.11 а.е.; толстая черная линия – 0.3 а.е.; тонкая черная линия – 0.08 а.е.). Значки – наблюдаемые в канале GOES 80-165 МэВ. (Struminsky, 2003а).

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 цикла (Struminsky, 2003b; Струминский, 2006). В частности, 20 января 2005 года – временной профиль интенсивности протонов в канале 80-165 МэВ имел два максимума, а вблизи Земли наблюдалось изменение спектра протонов, которое можно интерпретировать как новый эпизод 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, которая не учитывается при пересчете темпа счета детектора GOES в интенсивность. 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 на Солнце. 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 гамма-линий не достаточны для их диагностики. Результаты наблюдений жесткого рентгеновского излучения Солнца, приведенные в **Главе 1**, показывают, что ускоренные электроны взаимодействуют в солнечной атмосфере в течение нескольких десятков минут.

**В параграфе 3.4** проанализированы наблюдения наиболее мощных солнечных протонных событий 23 цикла в полярных областях гелиосферы на борту КА Ulysses Кильским электронным телескопом (KET). Данные наблюдений KET сравниваются с данными протонного детектора борту КА серии GOES. Для подробного анализа были отобраны события, в которых наблюдалось значимое превышение над фоном в канале 80-125 МэВ прибора KET/Ulysses. По данным наземных наблюдений большинство из этих событий сопровождалось возрастаниями интенсивности КЛ по данным НМ.

При анализе наблюдений СКЛ на двух КА, находящихся в различных точках гелиосферы, можно предположить два крайних случая распространения частиц до наблюдателя: 1) источник частиц может быть локализованным, причем один из аппаратов имеет с ним хорошее магнитное соединение, а другой нет; 2) источник на Солнце может быть протяженным в пространстве и времени, а магнитные силовые линии соединяют аппараты с различными частями источника. Так как поперечный коэффициент диффузии подавлен в  $10^{-4}$  -  $10^{-2}$  раз по сравнению с продольным коэффициентом, то в первом случае наблюдаемые интенсивности должны отличаться примерно в такое же число раз, при сохранении корреляционной зависимости. Если влияние поперечной диффузии мало по сравнению с непосредственной инжекцией на силовую линию, то корреляция между двумя наблюдениями во втором случае может отсутствовать.



**Рис. 11.** Сравнение интенсивность протонов в плоскости эклиптики (GOES) и северных (14 июля 2000, черный) и южных (22 ноября 2001, серый) полярных широтах гелиосферы (Ulysses) с температурой вспышечной плазмы (кривые). (Струминский, 2010).

Для девяти отобранных событий, наблюдавшихся в южных (июль-ноябрь 2000) и северных (август-декабрь 2001) полярных областях гелиосферы, оказалось, что интенсивности протонов 40-80 МэВ Ulysses различаются в 2-3 раза первые 20-30 часов после начала возрастания, независимо от взаимного расположения вспышки и КА. При этом соответствующие интенсивности GOES различались на 2-3 порядка, т.е. корреляция между наблюдениями на КА Ulysses и GOES отсутствовала, что свидетельствует о соединении аппаратов 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 года. В этом событии поток протонов вблизи Земли был минимальным, но на высоких широтах Ulysses его временной профиль интенсивности был подобен всем рассмотренным случаям, в которых отсутствовали возмущения солнечного ветра. 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 (**рис. 11**), то ожидаемые моменты начала их выхода из источника в полярные области гелиосферы будут соответствовать поздней фазе спада температуры плазмы в длительных вспышках, а в плоскости эклиптики – вблизи импульсной фазы (Struminsky et al., 2006; Струминский, 2010). 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 часов, а на высоких широтах наблюдался ее плавный рост, что можно обеспечить только длительной и практически непрерывной инжекцией в гелиосферу все это время. В **параграфе 1.2** показано, что повышенная эффективная температура вспышечной плазмы вызвана наличием нетепловых электронов, поэтому ее значения выше фоновых свидетельствуют о возможной инжекции частиц непосредственно из солнечного источника.

Серия четырех мощных протонных вспышек в декабре 2006 года была последним всплеском солнечной активности в 23 цикле и последними протонными событиями, зарегистрированными KET/Ulysses в полярных широтах гелиосферы (Heber et al., 2007). На примере наблюдений солнечных космических лучей (СКЛ) в различных точках гелиосферы в декабре 2006 года исследовалась роль крупномасштабного солнечного магнитного поля при распространении СКЛ до наблюдателя (Struminsky et al., 2009). Разработана методика расчета магнитных силовых линий в короне внутри сферического слоя 1.5 R над фотосферой для проверки магнитного соединения родительских вспышек с основаниями силовых линий Паркеровской спирали, проходящих через тот или иной КА.

Модель качественно объясняет наблюдаемые особенности событий 5, 13 и 14 декабря 2006 на КА Ulysses, GOES, STEREO. Однако она не объясняет наблюдения 6 декабря вблизи Земли, возможно, из-за перестройки коронального и межпланетного магнитного поля в результате распространения КВМ от события 5 декабря.

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.

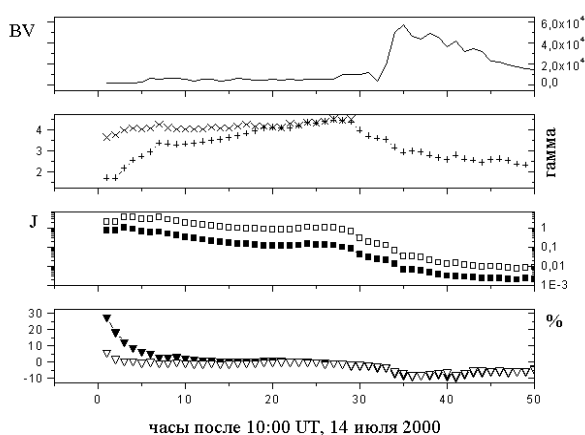
**В четвертой главе** рассматривается влияние различных крупномасштабных структур солнечного ветра на процессы распространения СКЛ в трехмерной гелиосфере.

Сильные межпланетные возмущения оказывают влияние на космические лучи с энергией менее 1 ГэВ, увеличивая их интенсивности на сотни процентов (эффект штормовых частиц), но их влияние значительно меньше на протоны больших энергий (предвестник эффекта Форбуша, Форбуш понижение). 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 года ([Struminsky, 2002](#)), 14-15 июля 2000 и 4-5 ноября 2001 ([Струминский, 2003b](#)) описано в **параграфе 4.1**.

Событие 19-21 октября 1989 года является тем редким случаем, когда спектр штормовых частиц простирался непрерывно вплоть до пороговой энергии нейтронных мониторов ([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](#)), но из других соображений.

В событиях 14 июля 2000 и 4 ноября 2001 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 года ([Struminsky&Kohno, 1993](#)). Наличие колена в этой области энергий и изменение жесткости геомагнитного обрезания во время геомагнитных бурь могут сильно изменить

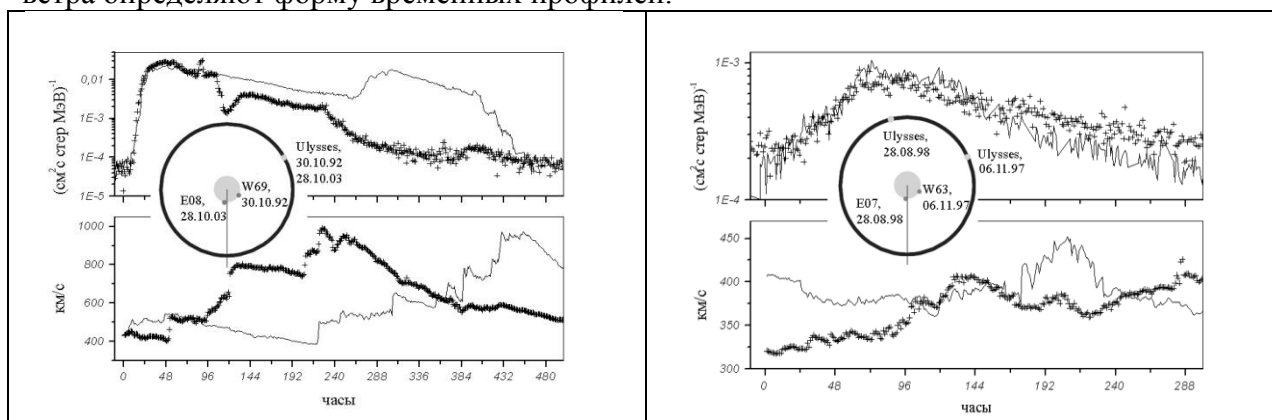
возможную интерпретацию данных НМ в момент наземных возрастаний интенсивности космических лучей (Struminsky, 2003c).



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

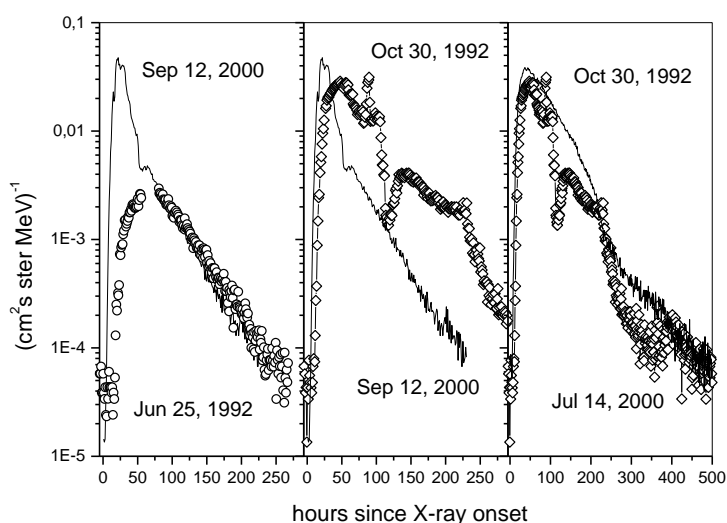
Если длительность инъекции сравнима со временем распространения, то невозможно разделить влияние эффектов источника и процессов распространения. Время распространения СКЛ на 5 а.е. заведомо превышает самые оптимистичные оценки длительности удержания протонов в короне и времени эффективного ускорения межпланетной ударной волной, поэтому наблюдения СКЛ вблизи орбиты Юпитера предоставляют уникальную возможность исследовать непосредственно эффекты распространения в плоскости эклиптики (Хибер и 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 часов) или поперек (медленный приход, 24 часа) силовых линий ММП (рис. 13). Так как быстрый или медленный приход частиц возможен независимо от взаимного расположения родительской вспышки и 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, подразумевая, одинаковые параметры распространения частиц в гелиосфере на расстояния более 5 а.е. в начале событий. На поздних стадиях развития событий первой группы полное число протонов, инжектированных в гелиосферу, и модуляция потока солнечных космических лучей локальными структурами солнечного ветра определяют форму временных профилей.



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

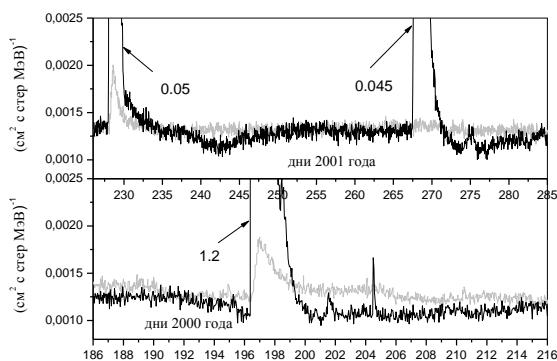
Далее проанализированы наблюдения эффекта «резервуара» в широком диапазоне широт и долгот в гелиосфере на расстояниях  $< 5$  а.е. (рис. 14). Сделан вывод, что «резервуаром» является область гелиосферы, соединенная с источником силовыми линиями ММП и ограниченная  $\sim 5$  а.е. На таком гелиоцентрическом расстоянии резко уменьшается радиальный коэффициент диффузии, что приводит к захвату частиц СКЛ на расстояниях  $< 5$  а.е. (поглощающая граница). Примерно первые 30 часов 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 часов 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)



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

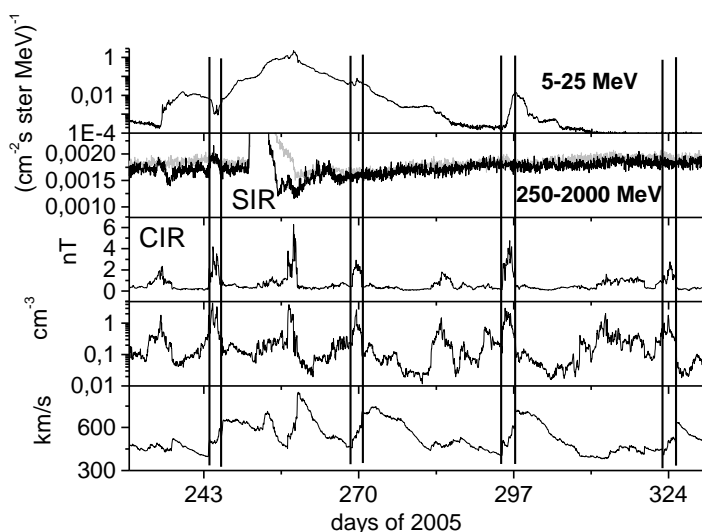
**В параграфе 4.3** исследовались вариации интенсивности протонов 200-2000 МэВ по данным КЕТ/Ulysses в 1997-2006 годах, т.е. практически на масштабе времени всего 23-го солнечного цикла. Интенсивности протонов 200-2000 МэВ КЕТ/Ulysses была нормирована к интенсивности протонов 165-500 МэВ GOES в мае-июне 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 2000-2003 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 года превзошло амплитуду 11-летней модуляции фона ГКЛ в 23-ем 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 рисунка, поэтому показаны цифрами. По горизонтали отложены дни 2000 (нижняя панель) и 2001(верхняя панель) годов. (Струминский, 2007)

Анализ возрастаний интенсивностей солнечных протонов в различных точках трехмерной гелиосферы по данным КА Ulysses показал, что наибольшие потоки протонов за весь 23-ий цикл солнечной активности должны были быть инжектированы в гелиосферу в событии 7 сентября 2005 года (**рис. 16**), а не 28 октября 2003 года, как это следует из наблюдений протонов  $\sim 10$  МэВ вблизи Земли, или 20 января 2005 года, или соответственно  $>100$  МэВ (Струминский, 2007; Struminsky et al, 2007). Если частицы СКЛ были ускорены в солнечных вспышках, то и солнечное событие 7 сентября 2005 года должно быть выделенным из этого ряда. Действительно, 7 сентября 2005 года 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. 1**).



**Рис. 15.** Наблюдения Ulysses в течение 100 дней 2005 года: интенсивность протонов 5-25 и 250-2000 МэВ; напряженность магнитного поля, плотность и скорость солнечного ветра. Серая кривая на второй панели показывает интенсивность протонов 165-500 МэВ GOES вблизи Земли (максимумы вне масштаба). Пары вертикальных линий обозначают границы взаимодействующих потоков. (Struminsky, 2007).

С другой стороны, 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, январе и сентябре 2005 года вблизи орбиты Юпитера по данным КА Ulysses. Анализ показал, что 60 дней после солнечных экстремальных событий октября-ноября 2003 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, 2007).

**В Заключении** обсуждаются полученные результаты и сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

### **Основные результаты, выносимые на защиту:**

- 1) Выявлено, что в солнечных вспышках балла  $>X1$  ускорение электронов с переменным спектром длительное время в последовательных эпизодах и их взаимодействие в различных физических условиях во вспышечной области приводит к отсутствию эффекта Нойперта (пропорциональность интенсивности нетеплового излучения производной по времени мягкого рентгеновского излучения).

- 2) Предложен новый подход к исследованию солнечных вспышек, который предполагает решение самосогласованных задач ускорения электронов, их взаимодействие 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 работы солнечного источника протонов в течение нескольких десятков минут после начала вспышки.

- 4) Установлено, что длительность и интенсивность инжекции солнечных протонов  $\sim 100$  МэВ из источника на Солнце определяет форму наблюдаемых временных профилей их интенсивности во время первых 15-20 часов 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 по данным детектора GOES и нейтронных мониторов, 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  $\sim 60$  часов в различных событиях на южных и северных полярных широтах гелиосферы. Это свидетельствует о симметричной инжекции протонов на полярные широты в длительных вспышках, что противоречит представлениям об их ускорении ударными волнами.

-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 протонов - 10-20 часов, сравнимая со временем распространения вдоль силовых линий ММП до  $\sim 5$  а.е. , показывает как быстро часть гелиосферы, соединенная с источником, заполняется частицами за счет продольной диффузии, а вторая константа спада  $\sim 100$  часов 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., Роль длительных рентгеновских вспышек на Солнце в формировании возмущений межпланетной среды, *Астрономический вестник*, 35 (6), 559-565, (2001).
2. Аушев В., Антонова В., Белов А., Ерошенко Е., Крякунова О., Струминский А., Статистический анализ возможных солнечных нейтронных событий по данным алма-атинского высокогорного нейтронного монитора, *Изв. РАН, Сер. Физическая*, том 67, № 4, стр. 472, 2003.
3. Струминский А.Б., Свидетельства длительного существования солнечных протонов с энергией  $>100$  МэВ в корональных структурах, *Астрономический журнал*, том 47, № 11, p. 916, 2003а.
4. Струминский А. Б., Особенности энергетического спектра солнечных протонов в событиях 14 июля 2000 и 4 ноября 2001, *Изв. РАН, Сер. Физическая*, том 67, №10, стр. 1427, 2003б.
5. Хибер Б. и Струминский А.Б., Свойства солнечно-протонных событий на больших гелиоцентрических расстояниях около эклиптики, *Изв. РАН, Сер. Физическая*, т. 69, №6, стр. 792-795, 2005.
6. Струминский А.Б., Многократное ускорение протонов и их свободное распространение до Земли 20 января 2005 г., *Письма в АЖ*, т. 32, №10, 767-776, 2006.
7. Струминский А.Б. и Зимовец И.В., Динамика развития мощных протонных вспышек на Солнце, *Письма в АЖ*, т. 33, № 9, с. 690-697, 2007.
8. Струминский А.Б., Возрастания интенсивности протонов 200-2000 МэВ в 1997-2005 годах по данным KET/ULYSSES, *Космические исследования*, том 45, № 4, с 1, 2007.
9. Струминский А.Б. и Зимовец И.В., Длительное нетепловое излучение солнечных вспышек и эффект Нойперта, *Письма в АЖ*, т. 34, № 10, с. 777-787, 2008.
10. Струминский А.Б. и Зимовец И.В., К оценке времени прихода первых релятивистских солнечных протонов на Землю, *Известия РАН, серия физическая*, том 73, № 3, с. 332-335, 2009.
11. А.Б. Струминский и И.В. Зимовец, Наблюдения солнечной вспышки 6 декабря 2006: ускорение электронов и нагрев плазмы, *Письма в АЖ*, т. 36, № 6, с. 453-461, 2010.
12. А.Б. Струминский, Источник солнечных протонов: температура вспышечной плазмы и моменты инжекции, *Изв. РАН, серия физическая*, т. 75, № 6, с. 818-821, 2011.
13. Struminsky A., Matsuoka M. and Takahashi K., Evidence of Additional Production of High Energy Neutrons During the Solar Flare on 1991 June 4, *ApJ*, v. 429, p. 400, 1994.
14. Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Oleneva, V.A., A.B. Struminsky, Yanke, V.G., What determines the magnitude of Forbush-decreases? *JASR*, Vol. 27, No. 3, p. 625, 2001.
15. Struminsky A., Forbush precursory increase and shock associated particles on October 20, 1989, *Annales Geophysicae*, 20, 8, 1247-1252, 2002.
16. Struminsky A., Heber B., Kallenrode M.-B., Muller-Mellin R., Klassen A., Kunow H., Injection and propagation of solar protons to high heliolatitudes: ULYSSES observations, *JASR*, V. 38, No 3, P. 507-515, 2006.
17. Struminsky A. and Heber B., KET ULYSSES Observations of SEP in and out of the Ecliptic, ISBN-13: 978-0-87590-430-6; ISBN-10: 0-87590-430-0 *Solar Energetic Particles and Plasma*, Geophysical Monograph Series, 165, pages 321-334, 2006.
18. Zimovets I.V., Gros M., Struminsky A.B., Evidence of the radio-quiet hard X-ray precursor of the 13 December 2006 solar flare, *Advances in Space Research*, V. 43, No 4, p. 680-686, 2009.
19. Zimovets I.V., Struminsky A.B., Imaging Observations of Quasi-Periodic Pulsatory Nonthermal Emission in Two-Ribbon Solar Flares, *Solar Physics*, DOI: 10.1007/s11207-009-9394-x, 2009.

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

**и в 25 публикациях по материалам конференций:**

1. Михайлов М.А. и Струминский А.Б., Солнечные нейтроны в событии 7 сентября 2005 года, Труды БМШЭТФ-2006 Москва, МИФИ, 2007.
2. Струминский А.Б., Физика Солнца и гелиосферы – ШН, Труды БМШЭТФ-2004, Москва, МИФИ, 2005.
3. Струминский А.Б., Распространение космических лучей в трехмерной гелиосфере, Труды БМШЭТФ-2006, Москва, МИФИ, 2007.
4. Струминский А.Б., Электромагнитная диагностика солнечных вспышек, БМШЭТФ-2007, Москва, МИФИ, 2008.
5. Струминский А.Б., Источник солнечных протонов: температура вспышечной плазмы и моменты инжекции, ВККЛ-2010, МГУ, Москва, 2010.
6. Струминский А.Б., Наблюдения радиоизлучения на частоте 245 МГц как индикатор нового режима ускорения электронов и нагрева плазмы, Пулково-2010
7. Aushev, V., Antonova, V., Belov, A., Eroshenko, E., Kryakunova, O., A. Struminsky, Search for Solar Neutron Events in Alma-Ata NM Data, 26<sup>th</sup> ICRC, Salt Lake City, Utah, USA, 1999.
8. Struminsky A. and Kohno T., Peculiarities of Solar Proton Spectra in Stratosphere and Geostationary Orbit on 2-3 November 1992, 23<sup>rd</sup> ICRC, Calgary, 1993, v. 3, p. 5.
9. Struminsky A., M. Matsuoka and K. Takakhashi, Evidence of Additional Production of High Energy Neutrons During the Solar Flare on 1991 June 4, Proceedings of Kofu Symposium, Kofu, Japan, September 6-10, 1993, NRO Report, no. 360, 1994, p. 405.
10. Belov A., Chertok I., Struminsky A., Time Evolution of Solar Proton Energetic Spectra at the Earth orbit and Possibility of Multi-Step Particle Acceleration. 24<sup>th</sup> ICRC, Rome, Italy, 1995, v. 4, p. 127.
11. Struminsky A., A. Belov, Neutron Monitor Sensitivity to Primary Protons below 3 GV Derived from Data of Ground Level Events, 25<sup>th</sup> ICRC, Durban, South Africa, 1997, v.1, p. 201
12. Struminsky A., Forbush decrease on October 20-22, 1989: solar protons, interplanetary and magnetospheric variations, 27<sup>th</sup> ICRC, vol. 9, p. 3558 Hamburg, Germany, 2001a.
13. Struminsky A. and M. Lal, Magnetospheric currents and variations of cutoff rigidities on October 20, 1989, 27<sup>th</sup> ICRC, vol. 10, p. 4053, Hamburg, Germany, 2001b.
14. Struminsky A., Interacting and Escaping > 100 MeV Solar Protons as observed on 11 and 15 June 1991, 28<sup>th</sup> ICRC, vol. 6, p.3515, 2003a.
15. Struminsky A., Prolonged Release of > 100 MeV Solar Protons in the GLE Events of 1997-2002, 28<sup>th</sup> ICRC, vol. 6, p. 3317, 2003b.
16. Struminsky A., On Accuracy of Solar Cosmic Ray Anisotropy and Intensity Deduced from NM Data, 28<sup>th</sup> ICRC(Tsucuba), v. 6, p. 3419, 2003c.
17. Struminsky A., Three modes of particle propagation in the heliosphere, ICRC 29<sup>th</sup>, Pune, India, 2005a.
18. Struminsky A., On Possibility of Prolonged Two Step Production of High Energy Neutrons during the Solar Flare on 28 October 2003, ICRC 29<sup>th</sup>, Pune, India, 2005b.
19. Struminsky A., Variations of solar proton spectrum during the ground level enhancement of 2005 January 20, ICRC 29<sup>th</sup>, Pune, India, 2005c.
20. Struminsky A., Enhancements of 200-2000 MeV proton intensity observed by KET/ULYSSES in 1997-2005, Proceedings ECRS2006, CD-rom, Lisbon, Portugal.

21. Struminsky A., B. Heber, R. Gomez-Herrero, A. Klassen, Modulation of Proton Fluxes at ~5AU during the Largest SEP Events of 2005, Proc. 30<sup>th</sup> ICRC, Merida, Mexico, 2008, No 1, 131-134.
22. Heber B., Struminsky A., I. Zimovets, and et al., Observations of the December 2006 Particle Events at High Latitudes with the KET aboard ULYSSES, Proc. 30<sup>th</sup> ICRC, Merida, Mexico, 2008, No 1, 217-220.
23. Struminsky A. and Zimovets I., Time Scales of Hard X-ray and Radio Emissions of Large Proton Flares, Proc. 30<sup>th</sup> ICRC, Merida, Mexico, 2008, No 1, 7-10.
24. Struminsky A. and I. Zimovets, On estimates of first solar proton arrival, , Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Cosmic Rae Symposium, 9-12 September 2008, Eds. P. Kyrally, K. Kudela, M. Stehlik, A.W. Wolfendale, printed by VIENALA s.r.o., Koshice, Slovakia
25. Struminsky A., Zimovets I., Heber B. and Klassen A., The role of large scale solar magnetic field for distribution of SEP in the 3D heliosphere, Proc. 31<sup>st</sup> ICRC, 2009, Lodz, Poland.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А. и Свиржевская А.К., Приход первых релятивистских протонов и условия в солнечной короне, Геомагнетизм и Аэрномия, 48, 4, 425-431 (2008).
- Зимовец И.В., Квазипериодические пульсации рентгеновского излучения солнечных вспышек, диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., 238 стр., ИКИ РАН, Москва, 2010.
- Любимов Г.П., Радиационные пояса Солнца, Космические Исследования, 40, 6, 565 (2002).
- Cane H. et al., A study of solar energetic particle events of 1997–2006: Their composition and associations, JGR, 115, A08101, doi:10.1029/2009JA014848 (2010).
- Clinger E., History of research on solar energetic particle (SEP) events: the evolving paradigm, Proc. IAU Symposium, Volume 257, p. 401-412 (2009).
- Dalla S., et al., Properties of high heliolatitude solar energetic particle events and constraints on models of acceleration and propagation, GRL, 30, 19, ULY 9-1 (2003a)
- .Dalla S., et al., Delay in solar energetic particle onsets at high heliographic latitudes Ann. Geophysicae , 21, 1267-1275, (2003b).
- Decker, R.B., et al., Solar Energetic Particles from the April 1998 Activity: Observations from 1 to 72 AU, Proc. 26<sup>th</sup> ICRC, USA, 6, 328 (1999).
- Feldman U., The beam-driven chromospheric evaporation model of solar flares - A model not supported by observations from nonimpulsive large flares, ApJ, 364, 322-325 (1990).
- Frost K. and Dennis B., Evidence from Hard X-Rays for Two-Stage Particle Acceleration in a Solar Flare, ApJ, 165, 655 (1971).
- Gosling J.T., The solar flare myth, JGR, 98, A11, 18937-18950 (1993).
- Gros, M.; et al., INTEGRAL/SPI Observation of the 2003 Oct 28 Solar Flare, Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop, ESA SP-552, (2004).
- Hamilton, D.C., Dynamics of solar cosmic ray events - Processes at large heliocentric distances /much greater than 1 AU, JASR, 1, 25-40. (1981).
- Kahler S. et al., Primary energy release, in Solar Flares, edited by P. A. Sturrock, Colorado associated University Press, Boulder, Colorado, (1980).
- Kallenrode M.B., Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Volume 29, Issue 5, pp. 965-981 (2003).
- Klecker B. et al., Energetic Particle Observations, Space Science Rev., 123, 217-250. (2006).
- Klein, L. and Trotter, G. The Origin of Solar Energetic Particle Events: Coronal Acceleration versus Shock Wave Acceleration, Space Science Rev., 95, 215-225, (2001)

Lario D. et al., Low-energy particle response to CMEs during the Ulysses solar maximum northern polar passage, *JGR*, 109, A1, A01107 (2004a).

Lario D., et al. Heliospheric energetic particle observations by the Cassini spacecraft: Correlation with 1 AU observations, *JGR*, Volume 109, Issue A9, CiteID A09S02(2004b).

Lario D. and Decker R.B., Re-examination of the October 20, 1989 ESP event, *Proc. 27<sup>th</sup> ICRC*, Hamburg, (2001).

Lario D. and Decker R.B., The energetic storm particle event of October 20, 1989, *GRL*, 29, 10, 31, DOI 10.1029/2001GL01401, (2002).

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

McKibben R.B., et al., 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*, 21, 1217-1228, (2003).

Murphy R. and Share G., OSSE Observations of the 4 June 1991 Solar Flare, 23rd ICRC Vol. 3, p.99 (1993).

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

Ramaty, R.; Mandzhavidze, N.; Kozlovsky, B.; Skibo, J. G., Acceleration in solar flares: Interacting particles versus interplanetary particles, *JASR*, 13, 9, 275 (1993).

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

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

Reames D.V., Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere, *Space Science Rev.*, 90, 3/4, 413-491 (1999).

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

Ryan J.M., Long-Duration Solar Gamma-Ray Flares, *Space Sci. Rev.*, 93, 581 (2000).

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

Takakhashi K., et al., *Proc. 22d ICRC*, 3, 37 (1991). Tylka A. et al., Shock Geometry, Seed Populations, and the Origin of Variable Elemental Composition at High Energies in Large Gradual Solar Particle Events, *ApJ*, 625, 474-495 (2005).

Zhang M. et al., Perpendicular transport of solar energetic particles in Heliospheric magnetic fields, *ApJ*, 595, 493-499 (2003)