

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И АЭРОНОМИИ ИМ. Ю.Г. ШАФЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

УДК 524.1

СТАРОДУБЦЕВ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ



**ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 11-ЛЕТНЕМ
ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

01.03.03 – Физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ЯКУТСК – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

Научный консультант: доктор физико-математических наук, академик Крымский Гермоген Филиппович

Официальные оппоненты:

Веселовский Игорь Станиславович, доктор физико-математических наук, профессор, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобелева МГУ, главный научный сотрудник

Струминский Алексей Борисович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН, ведущий научный сотрудник

Еселевич Виктор Григорьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики СО РАН, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Защита состоится 20 мая 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета № Д 003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.126-а, а/я 291.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт солнечно-земной физики СО РАН

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук



Поляков В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Воздействие плазмы солнечного ветра на потоки проникающих в гелиосферу галактических космических лучей (КЛ) приводит к возникновению временных изменений (вариаций) интенсивности КЛ в широком диапазоне временных масштабов. Интерес к исследованию вариаций интенсивности КЛ обусловлен тем, что они вызываются различными структурными образованиями солнечного ветра. В силу этого, изучение вариаций интенсивности КЛ позволяет получить важную информацию как о свойствах солнечного ветра, так и об особенностях строения гелиосферы в целом.

Исследования вариаций интенсивности КЛ, выполненные до недавнего времени, связаны, главным образом, с изучением длиннопериодных вариаций, имеющих характерный период сутки и более. Вместе с тем, особый интерес представляют короткопериодные вариации (флуктуации) интенсивности КЛ, периоды которых $T \leq 1$ час, поскольку они тесно связаны с особенно мощными возмущениями в солнечном ветре – сильными ударными волнами и высокоскоростными потоками.

Основной целью диссертации является исследование флуктуаций интенсивности КЛ.

Новизна работы состоит в том, что в ней впервые установлена природа флуктуаций интенсивности КЛ в окрестности крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Выполненный анализ измерений КЛ в течение длительного интервала времени позволил впервые установить существование закономерных изменений (модуляции) спектра флуктуаций интенсивности КЛ в цикле солнечной активности.

Теоретическая и практическая значимость работы. Создание модернизированного спектрографа КЛ позволяет производить непрерывную регистрацию потоков КЛ с энергией 2-300 ГэВ, что, в свою очередь, позволяет исследовать широкий класс явлений и процессов, протекающих в солнечном ветре.

Установленная в работе взаимосвязь флуктуаций интенсивности КЛ с крупномасштабными возмущениями солнечного ветра позволяет сделать содержательные предсказания о динамике спектра флуктуаций интенсивности КЛ.

Применение методов спектрального анализа к данным регистрации на космических аппаратах интенсивности КЛ и параметров солнечного ветра в режиме реального времени позволили создать и реализовать методику прогноза прихода на орбиту Земли межпланетных ударных волн.

Личный вклад автора определяется тем обстоятельством, что он провел подавляющую часть работы по обработке и анализу всего экспериментального материала, все тестовые расчеты полностью выполнены им. Автору принадлежит идея создания нового прибора - сцинтилляционного мюонного телескопа, под его руководством проходило воссоздание и модернизация спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина. Идеология и реализация метода прогноза прихода на орбиту Земли межпланетных ударных волн по измерениям флуктуаций интенсивности КЛ на космических аппаратах полностью принадлежит автору. В совместных с коллегами исследованиях автор внес преобладающий вклад на всех этапах работы: от постановки задачи, проведения численных расчетов, анализа и интерпретации полученных результатов, до выводов и написания научных публикаций.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Создан модернизированный спектрограф КЛ, позволяющий производить непрерывную регистрацию интенсивности КЛ из 13 различных направлений в диапазоне энергий 2-300 ГэВ.
2. Установлено, что в окрестности крупномасштабных возмущений потоками КЛ с энергиями ~ 10 кэВ - ~ 10 МэВ могут генерироваться быстрые магнитозвуковые волны. Доказано, что основным фактором, обуславливающим возникновение флуктуаций интенсивности КЛ, являются быстрые магнитозвуковые волны в солнечном ветре.
3. Впервые установлено, что спектры мощности флуктуаций интенсивности КЛ в области энергий ~ 10 кэВ - ~ 1 ГэВ испытывают закономерные изменения в 11-летнем цикле солнечной активности.
4. Установлено, что в 23-м солнечном цикле энергетические спектры эффектов Форбуша являются существенно более жесткими, чем в трех предыдущих циклах.
5. Разработан метод прогноза, который, на основе измерений флуктуаций интенсивности КЛ на космических аппаратах, с заблаговременностью 1-2 дня позволяет предсказывать приход к Земле крупномасштабных возмущений солнечного ветра.

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты опубликованы в 46 статьях [1-46], в том числе 23 в рецензируемых журналах из перечня ведущих периодических изданий ВАК и цитируемых на научных платформах Web of Science и Scopus.

Достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена тем, что все они основаны на использовании современных теоретических и экспериментальных методов, подтверждены ссылками на них в работах других авторов, тем, что они докладывались и обсуждались на целом ряде представительных российских и международных научных форумов. Она подтверждается также тем обстоятельством, что работа выполнялась в рамках различных грантов и программ, прошедших независимую экспертизу.

Апробация работы. Результаты, послужившие основой диссертации, докладывались на следующих научных мероприятиях: Международных конференциях по космическим лучам (Москва, 1987 г.; Пуне, Индия, 2005 г.; Мерида, Мексика, 2007 г.; Лодзь, Польша, 2009 г.; Пекин, КНР, 2011 г.; Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2013 г.), на Международном семинаре по проекту №8 КАПГ (София, Болгария, 1985 г.), на 27-м пленарном совещании комитета по исследованию космического пространства (Хельсинки, Финляндия, 1988 г.), на 1-м Международном симпозиуме по космическому климату (Оулу, Финляндия, 2004 г.), на 22-м Европейском симпозиуме по космическим лучам (Москва, 2012 г.), на научных ассамблеях КОСПАР (Пекин, КНР, 2006 г.; Бремен, Германия, 2010 г.), на Всесоюзных совещаниях секции солнечных протонных событий проблемного Совета «Солнце-Земля» (Горький, 1983 г.; Апатиты, 1984 г.; Дубна, 1986 г.; Ленинград, 1987 г.), Всесоюзном семинаре «Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле» (Пушино, 1989 г.), Всесоюзных и Всероссийских конференциях по космическим лучам (Якутск, 1984 г.; Дубна, 2000 г.; Москва, 2002, 2004, 2006 гг.), 10-й Китайско-Российской конференции по космической погоде (Пекин, КНР, 2010 г.), 11-й Российско-Китайской конференции по космической погоде (Иркутск, 2012 г.), Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова (Иркутск, 2013 г.), на научных семинарах ИЗМИРАН, ФИАН, ИГиГ СО АН СССР, ИСЗФ СО РАН и ИКФИА СО РАН.

Диссертация выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 00-02-96204-р9арктика, 01-02-17278-а, 03-02-96060-р2003арктика_а, 04-02-26639-з, 04-07-90054-в, 05-02-26915-з, 06-02-26901-з, 06-02-96008-р_восток_а, 07-02-00972-а, 07-02-08364-з, 09-02-00425-а, 09-02-06161-г, 09-02-12022-офи_м, 09-02-98507-р_восток_а, 09-02-98511-р_восток_а, 10-02-00877-а, и 12-02-98507-р_восток_а, Программ Президиума РАН № 8, 10 и 16 (2006-2013 гг.), грантов Президента РФ для поддержки ведущей научной школы НШ-422.2003.2, НШ-3968.2008.2, НШ-3526.2010.2 и НШ-1741.2012.2, гранта ИНТАС 2000-752, а также Академии наук Финляндии (решения №. 107796 от 14.02.2005 г., 112456 от 16.01.2006 г., 121118 от 03.04.2007 г. и 131567 от 31.03.2009 г.).

Структура и объем работы:

Диссертация состоит введения, 8-ми глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 239 страницах, включает в себя 68 рисунков, 13 таблиц, 242 библиографических ссылки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, представлены основные результаты и защищаемые положения, определены новизна и научная ценность работы, а также кратко изложено содержание диссертации.

В **главе 1** рассматривается вопрос о модернизации спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина, заключающейся в создании нового прибора - сцинтилляционного мюонного телескопа и новых открывающихся возможностях при исследовании вариаций интенсивности КЛ. В ней приводится описание современного спектрографа КЛ и детекторов, входящих в его состав.

Созданный в середине 1950-х годов Якутский спектрограф КЛ многие годы являлся единственным прибором в СССР и России, обеспечивающим долговременную и непрерывную регистрацию частиц в одном пункте в интервале энергии от 2 до 300 ГэВ. Однако в связи с передачей здания, в котором располагался спектрограф, Якутской епархии Русской Православной Церкви, весной 2004 г. весь комплекс установок, входящих в состав спектрографа, был перенесен на новое место. В мае 2009 г. спектрограф КЛ им. А.И. Кузьмина был введен в эксплуатацию. Схематическое представление приборов, входящих в состав спектрографа КЛ, приведено на рисунке 1. В настоящее время он состоит из большой ионизационной камеры АСК-1 объемом 950 л, нейтронного монитора 24-NM-64 и 4-х однотипных мюонных телескопов на газоразрядных счетчиках СГМ-14. Мюонные телескопы расположены на поверхности земли на уровне 0 м водного эквивалента (в.э.) и, в специально вырытой шахте глубиной 25 м, на уровнях 7, 20 и 40 м в.э. Телескопы способны регистрировать мюоны, приходящие из 5 направлений: вертикаль, 30^0 и 60^0 к северу и югу от нее, соответственно.

Современная станция КЛ Якутск имеет следующие характеристики: географическая долгота $129^041'E$, географическая широта $61^059'N$, высота над уровнем моря 95 м, порог геомагнитного обрезания $R_c=1.65$ ГВ.

При эксплуатации существующих мюонных телескопов часто возникают проблемы технического характера. После установки в шахте всех мюонных телескопов в течение

2009-2012 гг. были заменены 101 счетчик СГМ-14 и более 20 усилителей. Причиной этого является физическое старение счетчиков и их высокая чувствительность к изменениям влажности и температуры окружающей среды. Отрицательная температура в шахте, которая располагается в вечномерзлом грунте, приводит к значительному падению эффективности регистрации частиц за счет конденсации паров циклогексана, наполняющих счетчики СГМ-14. Это приводит к смещению рабочего плато счетчиков в область высоких напряжений и их переходу в режим генерации большого числа ложных импульсов, а при температурах ниже -5°C делает использование газоразрядных счетчиков СГМ-14 невозможным.

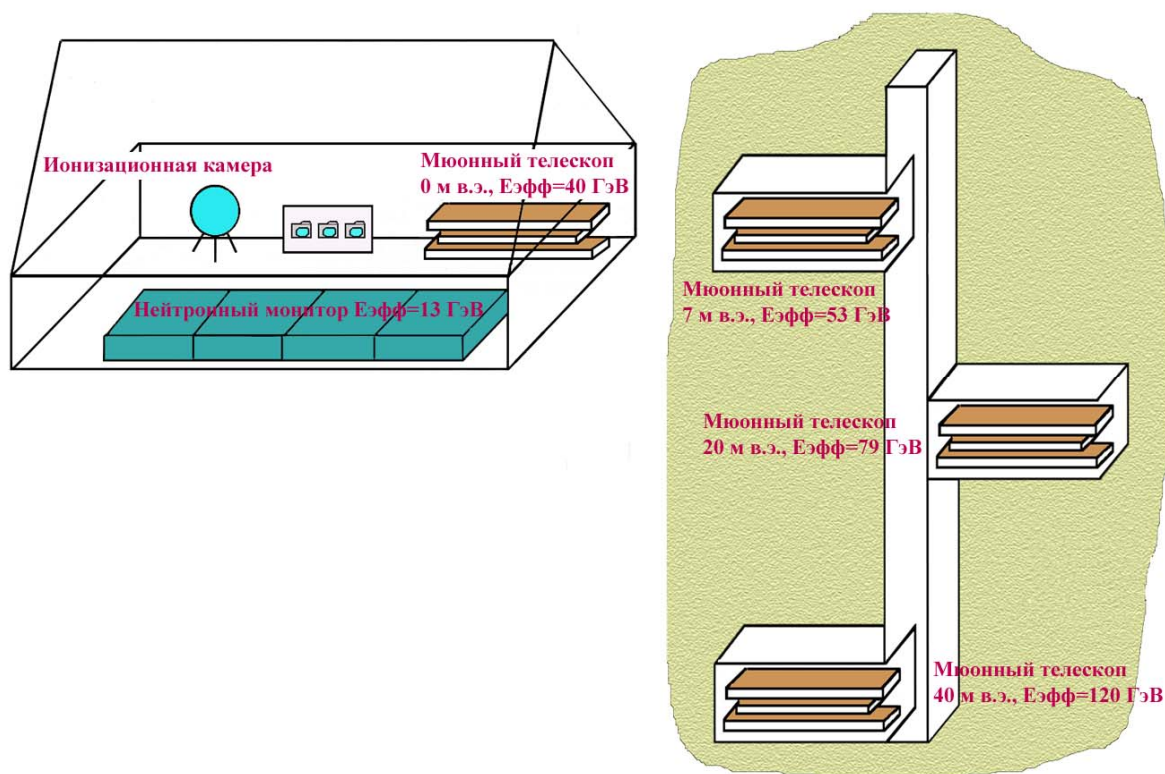


Рисунок 1 - Схематическое представление расположения приборов, входящих в состав спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина.

В связи с этим существует неотложная необходимость глубокой модернизации спектрографа КЛ. Она состоит в создании современных сцинтилляционных мюонных телескопов. Детекторами частиц в телескопах являются сцинтилляционные счетчики СЦ-301, производства Государственного федерального бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий» НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино, Московской области).

Сцинтилляционные телескопы являются дополнением к существующему в настоящее время комплексу мюонных детекторов. Весьма существенным является то обстоятельство, что при их эксплуатации значительно упрощается техническое обслуживание оборудования, повышается информативность и стабильность работы телескопов. При этом важным является независимость работы сцинтилляционных телескопов от колебаний температуры (согласно паспорту рабочий диапазон температур сцинтилляционного счетчика составляет от -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$) и влажности окружающей среды, что является определяющим фактором для размещения телескопов в шахте в условиях вечной мерзлоты.

Общий вид одного из созданных сцинтилляционных телескопов приведен на рисунке 2. Телескоп состоит из двух слоев полистирольного сцинтиллятора, разделенных зазором в 1 м. Линейные размеры конструкции телескопа – $4.74 \times 3.02 \times 1.00$ м. Каждый слой составлен из 8 пластин размером 1.24×1.06 м, толщиной 0.03 м. Эффективная площадь регистрации одного слоя телескопа составляет 8 м^2 . Внешние размеры телескопа и, соответственно, количество используемых счетчиков определяется размерами штреков подземной шахты, в которой они устанавливаются. При этом конструкция сцинтилляционных телескопов предусматривает сохранение в штреке действующих телескопов на газоразрядных счетчиках. С помощью электронной схемы, основанной на двойных совпадениях, телескоп способен регистрировать интенсивность мюонов, приходящих из 13 направлений: вертикаль (V), север (N), юг (S), восток (E) и запад (W) под углами 50° от зенита, N, S - 67° ; N, S - 74° ; NE, NW, SE и SW - 59° .

Важным обстоятельством является тот факт, что сцинтилляционные счетчики СЦ-301 способны регистрировать не только мюоны, но и электроны и γ -кванты. Однако при расположении сцинтилляционных телескопов в шахте, последние отсекаются грунтом.

Для корректного использования данных регистрации телескопов необходимо знать их приемные характеристики, определяемые геометрией прибора, влиянием атмосферы и магнитного поля Земли в пункте наблюдения на регистрируемые частицы. Это достигается с помощью учета диаграмм направленности, определяющих его чувствительность к различным углам прихода частиц, и коэффициентов связи телескопов, отражающих относительную чувствительность детектора к энергиям КЛ. Для примера, на рисунках 3 и 4 приведены зенитные и азимутальные диаграммы направленности и коэффициенты связи для регистрации мюонов по вертикали и под углом 50° на уровнях 0, 7, 20 и 40 м в.э., соответственно.



Рисунок 2 – Созданный сцинтилляционный мюонный телескоп.

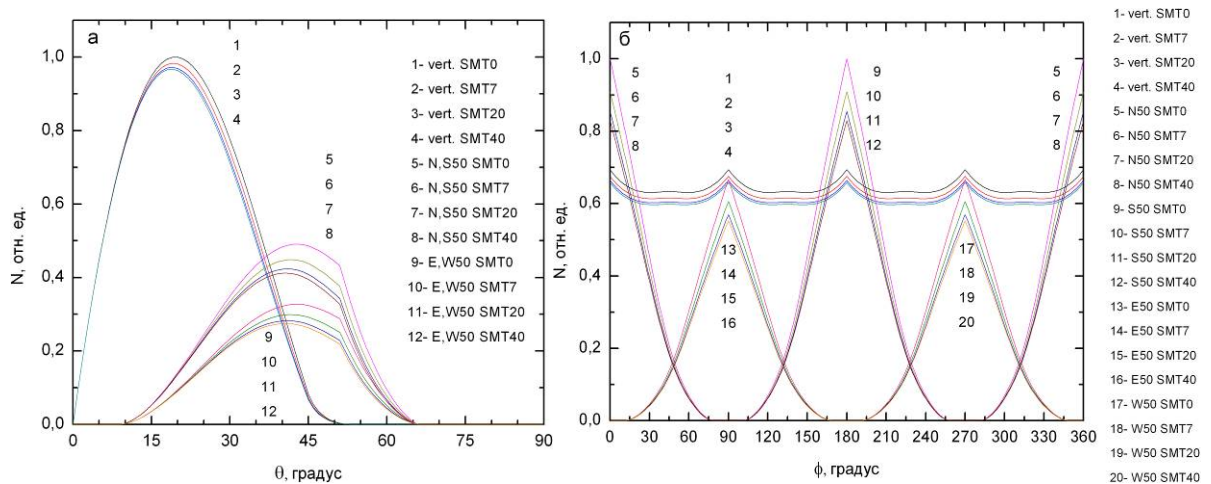


Рисунок 3 – Zenитные (а) и азимутальные (б) диаграммы направленности сцинтилляционных телескопов, установленных на разных уровнях, для направлений вертикаль и под углом 50° на уровнях 0, 7, 20 и 40 м в.э.

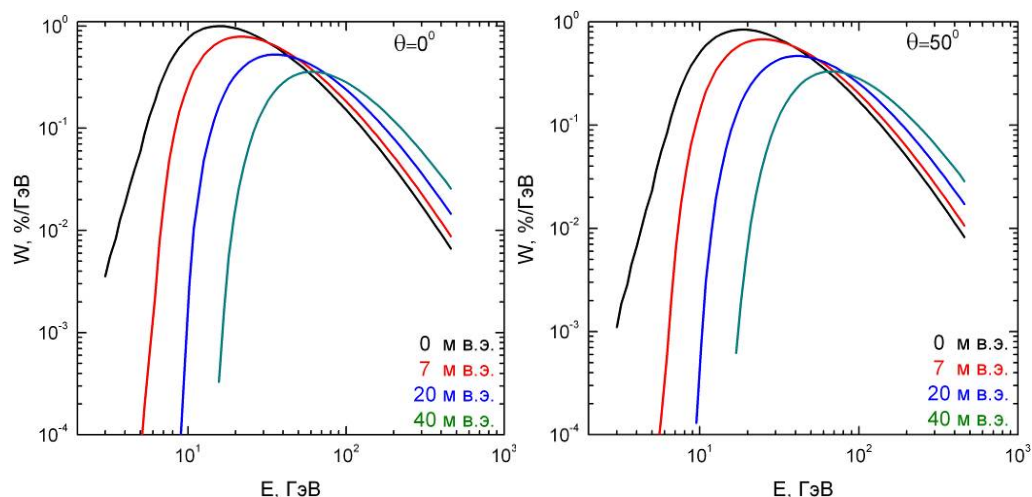


Рисунок 4 - Коэффициенты связи сцинтилляционных мюонных телескопов, установленных на разных уровнях, для зенитных углов 0° и 50° .

Определяющей характеристикой спектрографа являются эффективные энергии его детекторов. В таблице 1 приведены эффективные энергии КЛ, которые способны зарегистрировать сцинтилляционные телескопы, рассчитанные для разных уровней регистрации частиц. Исходя из представленных выше характеристик, в качестве примера, в таблице 2 приведены ожидаемые темпы счета новых сцинтилляционных телескопов для уровней 0, 7, 20 и 40 м.в.э. для направлений регистрации мюонов по вертикали и 50° с севера (N), юга (S), востока (E) и запада (W).

Таблица 1 - Эффективные энергии регистрации КЛ сцинтилляционными мюонными телескопами (ГэВ)

	Направления регистрации мюонов				
Уровень регистрации мюонов	вертикаль	50° N, S, E, W	67° N, S	74° N, S	59° NE, NW, SE, SW
0 м.в.э.	31.1	36.2	56.0	72.1	42.7
7 м.в.э.	41.1	46.8	69.5	86.5	54.0
20 м.в.э.	62.3	69.7	98.1	120.4	78.8
40 м.в.э.	96.6	104.6	135.4	161.0	113.6

Проведенные оценки темпа счета и ошибок измерений показывают, что новые телескопы имеют лучшие характеристики, чем существующие.

В настоящее время созданы 3 однотипных сцинтилляционных мюонных телескопа нового поколения, которые установлены на уровнях 7, 20 и 40 м в.э.

При использовании данных регистрации новых телескопов возникает ряд новых научных задач. В частности, появляются возможности изучения восточно-западной асимметрии КЛ, проведения оценок углового распределения анизотропии КЛ за каждый час измерений в режиме реального времени, более детального исследования наземных возрастаний солнечных КЛ, а также изучения флуктуаций интенсивности КЛ в области энергий более 10 ГэВ и разработки новых методов прогноза космической погоды.

Таблица 2 – Ожидаемый темп счета и статистические ошибки измерений сцинтилляционных мюонных телескопов при регистрации на разных уровнях и под различными углами.

0 м в.э.			7 мв.э.		
Направления регистрации	Темп счета, имп./час	Статистическая ошибка, %	Направления регистрации	Темп счета, имп./час	Статистическая ошибка, %
Вертикаль	1 340 000	0.086	Вертикаль	653 650	0.123
50° (N,S)	255 400	0.198	50° (N,S)	124 600	0.283
50° (E,W)	170 300	0.242	50° (E,W)	83 100	0.347

20 м в.э.			40 м в.э.		
Направления регистрации	Темп счета, имп./час	Статистическая ошибка, %	Направления регистрации	Темп счета, имп./час	Статистическая ошибка, %
Вертикаль	311 600	0.179	Вертикаль	132 650	0.274
50° (N,S)	59 400	0.410	50° (N,S)	25 300	0.628
50° (E,W)	39 600	0.502	50° (E,W)	16 850	0.770

Во второй главе приведен обзор современного состояния исследований флуктуаций интенсивности КЛ, рассмотрены вопросы об их возможных источниках. Сделано заключение, что флуктуации интенсивности КЛ имеют межпланетное происхождение. Определенное место уделено результатам исследований динамики спектра флуктуаций интенсивности КЛ во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра, изучению их свойств разными группами авторов по измерениям на Земле и в околоземном

космическом пространстве. Сделан вывод, что регистрация флуктуаций интенсивности КЛ в режиме реального времени может быть использована для краткосрочного (до нескольких суток) прогноза прихода крупномасштабных возмущений солнечного ветра на орбиту Земли.

Третья глава посвящена методам исследования флуктуационных явлений в интенсивности КЛ и солнечном ветре. В ней рассмотрены вопросы классификации и основных характеристик временных процессов, методов фильтрации, корреляционного анализа и спектрального оценивания данных измерений.

При исследовании флуктуационных явлений в интенсивности КЛ и солнечном ветре возникают значительные затруднения. Это связано с несколькими весьма существенными обстоятельствами. Во-первых, с малостью длин используемых реализаций данных; во-вторых, с малостью амплитуд изучаемых сигналов, замаскированных большим уровнем шума в данных измерений; и, в-третьих, с нестационарностью временных рядов. В этом случае обычные методы корреляционного анализа зачастую оказываются малоэффективными именно по этим причинам. Наиболее эффективными являются методы спектрального анализа, позволяющие не только оценить наличие выделенных амплитуд и частот сигналов в данных регистрации, но и их достоверность. Этим обусловлен выбор автором методов исследования флуктуационных явлений с помощью методов спектрального оценивания временных рядов: Блэкмена-Тьюки и быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Особое внимание в этой главе уделено тестовым модельным расчетам спектральных характеристик временных рядов. Важным обстоятельством при анализе временных рядов является проверка правильности работоспособности программ, созданных на основе известных алгоритмов. Для этого автор использовал 2 подхода – 1-й основан на свойствах равномерно распределенного шума, характеристики которого хорошо известны, 2-й - на модельных расчетах спектральной мощности флуктуаций межпланетного магнитного поля по заданным параметрам.

В качестве примера на рисунке 5 приведена оценка средней мощности сигнала, рассчитанная для равномерно распределенного шума методом Блэкмена-Тьюки. В нем полную энергию несет дисперсия σ^2 . В случае распределения амплитуды равномерного шума в пределах $[-0.5; +0.5]$ теоретическое значение дисперсии равно $\sigma_{теор}^2 = 0.083333333$. Расчеты показывают, что оценка средней мощности по спектру равна $P_{cp} = 0.0834 \pm 0.0241$, а его показатель близок к нулю: $\alpha = -0,0461 \pm 0,0333$. Таким образом, в пределах 95% доверительного интервала оценка средней мощности хорошо

совпадает с ожидаемой теоретической величиной. Незначительное отличие мощности от ее теоретического значения на рисунке 5 в большую сторону связано с малой длиной реализации.

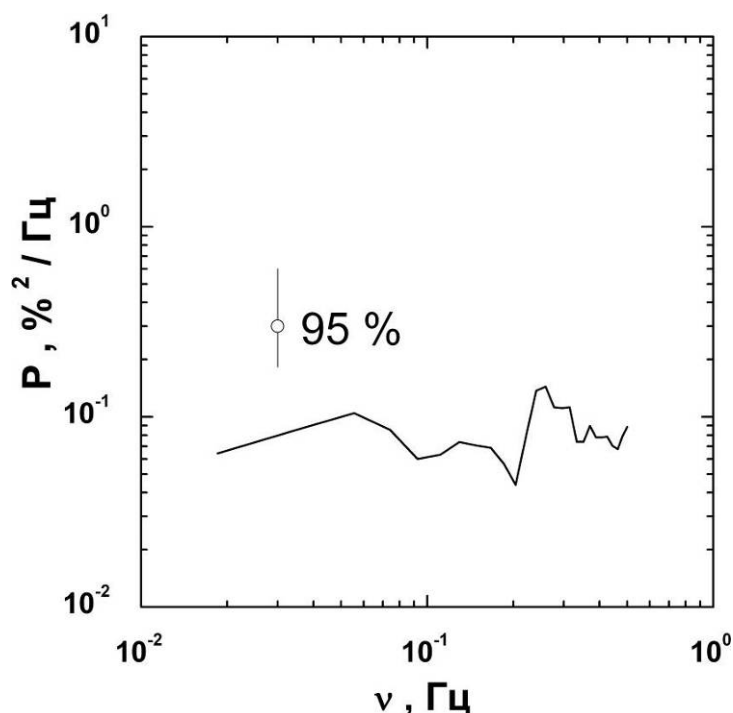


Рисунок 5 - Плотность спектра мощности равномерно распределенного шума на интервале $[-0.5; +0.5]$, рассчитанная методом Блэкмена-Тьюки. Указан 95%-й доверительный интервал.

Другим тестом корректной работоспособности программы служит модельный расчет спектральных характеристик по заданным параметрам. Автор использовал численную схему Оуэнса для генерирования флуктуаций межпланетного магнитного поля, имеющих произвольный спектр мощности [47]. В ней спектр мощности по волновым числам k задается в виде:

$$P(k) = 2.6\sigma^2 L / (1 + (kL)^{1.5}),$$

где L - корреляционная длина, σ - стандартное отклонение, k - волновое число. В этом случае, через обратное БПФ можно восстановить исходную временную реализацию. Далее, проводя прямое БПФ этой реализации, можно получить исходный спектр (рисунок 6) и сравнить его с модельным. Удовлетворительное совпадение теоретически заданного и восстановленного спектров является тестом работоспособности программы.

Метод Оуэнса обладает важным достоинством, которое состоит в том, что с помощью одного обратного БПФ можно сгенерировать две ортогональных реализации

временных процессов, что является важным при теоретическом изучении МГД-турбулентности альфвеновского типа.

Из рисунка 6 видно, что, действительно, теоретические и восстановленные спектры мощности удовлетворительно совпадают между собой.

Таким образом, проведенное на основе модельных расчетов, тестирование программ для расчета функций спектральных плотностей, описывающих основные характеристики случайных процессов, позволяют сделать вывод о вполне удовлетворительном совпадении полученных оценок с ожидаемыми теоретическими величинами. Следовательно, используемые подходы и разработанные пакеты программ для численных расчетов спектральных характеристик временных рядов, на основе используемых в работе методов и алгоритмов, могут применяться при исследовании флуктуационных явлений в интенсивности КЛ, межпланетном магнитном поле и параметрах солнечного ветра.

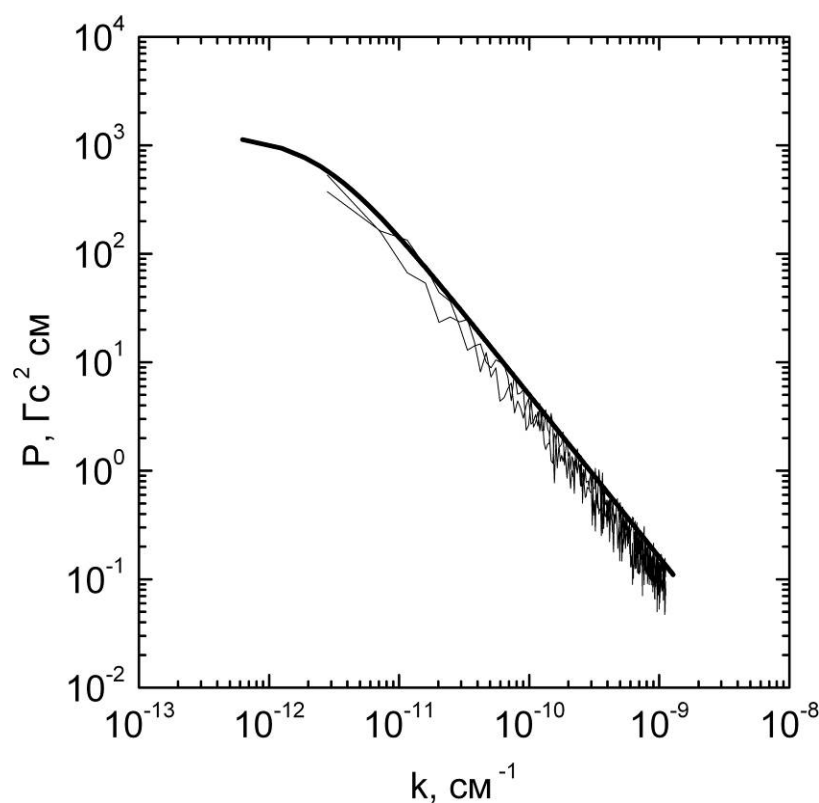


Рисунок 6 - Модельные расчеты плотности спектра мощности флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля в инерциальной области спектра турбулентности солнечного ветра по волновым числам. Жирная линия - спектр, заданный методом Оуэнса, тонкие линии - два восстановленных спектра.

В **Главе 4** рассматриваются вопросы, связанные с установлением природы флуктуаций интенсивности КЛ.

В настоящее время по этому вопросу существуют две различные точки зрения. В одной развиваются представления о возникновении флуктуаций интенсивности КЛ при рассеяниях потока заряженных частиц на альфвеновских волнах. Другая связана с тем, что флуктуации могут являться следствием модуляции интенсивности КЛ быстрыми магнитозвуковыми волнами, генерированными в окрестности Земли низкоэнергичными КЛ с энергией ~ 10 кэВ $\div \sim 10$ МэВ межпланетного или солнечного происхождения.

Теория для частиц КЛ высоких энергий (более 1 ГэВ), устанавливающая связь между спектрами флуктуаций КЛ и межпланетного магнитного поля была разработана Оуэнсом [48]. В его работе на основе кинетического уравнения рассматривалось движение заряженных частиц в стохастическом межпланетном магнитном поле с отличным от нуля средним значением, анализировались эффекты, связанные с нелинейными членами уравнения, резонансное взаимодействие частиц КЛ и межпланетного магнитного поля, а также анизотропия потока КЛ. В результате им было получено уравнение, связывающее спектры флуктуаций КЛ и межпланетного магнитного поля [48]:

$$\frac{P_{KL}(\nu, \mu, V)}{J_0^2} = C(\nu, \mu) \frac{P_{B\perp}}{B_0^2} (\delta_{\parallel})^2, \quad (1)$$

где B_0 - средняя напряженность межпланетного магнитного поля, J_0 - поток КЛ, V - скорость частиц КЛ, $\delta_{\parallel}$ - анизотропия потока КЛ вдоль магнитного поля, $C(\nu, \mu)$ - параметр, учитывающий нелинейное взаимодействие вблизи резонансных частот и сложным образом зависящий от скорости солнечного ветра U и пич-углового распределения частиц $\mu = \cos \theta$, резонансной циклотронной частоты ω_0 , угла φ между направлением скорости солнечного ветра и силовыми линиями межпланетного магнитного поля. При сравнении теоретических и экспериментальных спектров флуктуаций интенсивности КЛ выяснилось, что для частот $\nu < 10^{-4}$ Гц между ними наблюдается хорошее согласие. Для частот же $\nu > 10^{-4}$ Гц мощность экспериментальных спектров достигает значений существенно больших, чем это предсказывает теория [1-3, 48-51]. Это может быть следствием малой анизотропии КЛ, наблюдающейся при столь высоких энергиях. Действительно, согласно уравнению (1), мощность флуктуаций КЛ пропорциональна квадрату анизотропии $\delta_{\parallel}$, которая по порядку величины для релятивистских КЛ составляет $\delta_{\parallel} \sim U / c \sim 10^{-3}$ (здесь c - скорость света). Таким образом, наличие коэффициента равному по порядку величины 10^{-6} в уравнении (1) приводит к

расхождению в оценках теоретической и полученной в эксперименте мощности флуктуаций КЛ в области частот $\nu > 10^{-4}$ Гц.

В работе Бережко и Стародубцева [1] отмечается, что значительно больших эффектов во флуктуациях интенсивности КЛ следует ожидать при наличии в солнечном ветре магнитозвуковой турбулентности, поскольку она модулирует не только малую анизотропную часть функции распределения КЛ, но также основную изотропную составляющую интенсивности КЛ. В ней была установлена ожидаемая связь между спектрами флуктуаций КЛ и межпланетного магнитного поля [1]:

$$\frac{P_{KL}(\nu)}{j_0^2} = \left[\frac{(\gamma + 2)C_a(C_w + U \sin \varphi)}{3\pi\sqrt{2}k_\perp \nu} \right]^2 \frac{P_B(\nu)}{B_0^2}, \quad (2)_{\Gamma}$$

где $\gamma = 2.7$ - показатель энергетического спектра КЛ в области энергий более 1 ГэВ, $\kappa_\perp$ - коэффициент поперечной диффузии КЛ по отношению к направлению среднего межпланетного магнитного поля, $C_w = \sqrt{C_a^2 + C_s^2}$ - скорость волны, C_a - альфвеновская, C_s - магнитозвуковая скорости в солнечном ветре ($C_a \approx C_s$), φ - угол между линией Солнце-Земля и направлением среднего межпланетного магнитного поля, ν - частота.

Проведенные оценки [1, 3] показывают, что для КЛ с энергией ~ 1 ГэВ множитель, стоящий в правой части выражения (2), рассчитанный для средних параметров солнечного ветра $C_a \approx 4.6 \cdot 10^6$ см/с, $U \approx 4 \cdot 10^7$ см/с, поперечного коэффициента диффузии определяемого локально, в области генерации быстрых магнитозвуковых волн в окрестности орбиты Земли низкоэнергичными ($E_p \sim 10$ кэВ $\div 10$ МэВ) частицами

$\kappa_\perp = \left(\frac{\rho_B^c}{3}\right)\left(\frac{\rho_B^c}{\lambda_\parallel}\right)$, гирорадиуса $\rho_B = 3 \cdot 10^{10}$ см, пробега до рассеяния $\lambda_\parallel = 3 \cdot 10^{13}$ см,

равен $7.1 \cdot 10^{-8} (\sin \varphi + 0.16)^2 / \nu^2$. По порядку величины для частот $\nu = 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$ Гц

он составляет $(10^{-2} \div 1)$. Это на несколько порядков величины больше соответствующего множителя в выражении (1), который определяет флуктуации анизотропной части интенсивности КЛ, и рассмотрением которой, как правило, ограничиваются, полагая, что турбулентное межпланетное магнитное поле представлено альфвеновскими волнами [48-50]. Таким образом, при предположении о модулирующем воздействии быстрых магнитозвуковых волн (через колебания плотности солнечного ветра) на интенсивность КЛ высоких энергий, в области частот $\nu > 10^{-4}$ Гц расхождения между теоретическими и экспериментальными оценками мощности флуктуаций КЛ и межпланетного магнитного

поля, в пределах статистических неопределенностей последних, снимаются [1-3]. Чтобы сопоставить результаты теории и эксперимента, достаточно на основе выражения (2) вычислить ожидаемый спектр флуктуаций интенсивности КЛ на основании экспериментального спектра флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля домноженного на функцию когерентности между модулем межпланетного магнитного поля и концентрацией плазмы солнечного ветра.

Результаты исследований флуктуаций интенсивности КЛ, возникающих в окрестности фронтов межпланетных ударных волн и в области взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра, подтверждают этот вывод [1, 3].

В качестве примера, на рисунке 7 представлены результаты расчетов для события 30 апреля 1978 г. В этом случае ожидаемая мощность на частоте $\nu \sim 10^{-3}$ Гц составляет $3.6 \cdot 10^{-2}$ 1/Гц, т.е. с учетом статистических неопределенностей это значение хорошо согласуется с измерениями.

Изучение 177 событий прохождения межпланетных ударных волн через космический аппарат ACE, расположенный в точке либрации L1, позволяет обоснованно заключить, что в области перед фронтами межпланетных ударных волн под воздействием быстрой магнитозвуковой турбулентности возникают флуктуации интенсивности КЛ не только высоких, но и существенно более низких энергий [4-6]. Это подтверждается существованием высокой степени когерентных флуктуаций КЛ в широком интервале энергий от десятков кэВ до нескольких ГэВ. Необходимым условием их возникновения является наличие перед фронтом межпланетных ударных волн низкоэнергичных (10 кэВ - 10 МэВ) КЛ с большими величинами градиентов и потоков.

В **Главе 5** изучаются флуктуации интенсивности КЛ в цикле солнечной активности по измерениям на сети нейтронных мониторов, в магнитосфере Земли и в солнечном ветре. Предпосылкой для этого явилось следующее. Одним из основных факторов, определяющих флуктуации интенсивности КЛ, является уровень возмущенности солнечного ветра. Частота крупномасштабных возмущений межпланетной среды и их наземные проявления закономерно меняются в цикле солнечной активности. В таком случае можно предположить, что уровень мелкомасштабной возмущенности или турбулентности солнечного ветра (главным образом, возмущений межпланетного магнитного поля с характерным масштабом < 1 а.е.) также испытывает соответствующие изменения с циклом солнечной активности. Тогда, исходя из природы флуктуаций интенсивности КЛ [1, 3], можно ожидать, что их спектр мощности также должен испытывать соответствующую, коррелированную с циклом солнечной активности эволюцию.

Для изучения предполагаемой 11-летней модуляции спектра флуктуаций интенсивности КЛ к анализу привлекались данные восьми нейтронных мониторов мировой сети станций КЛ с порогами геомагнитного обрезания от 0.5 до 6.3 ГВ [7, 8].

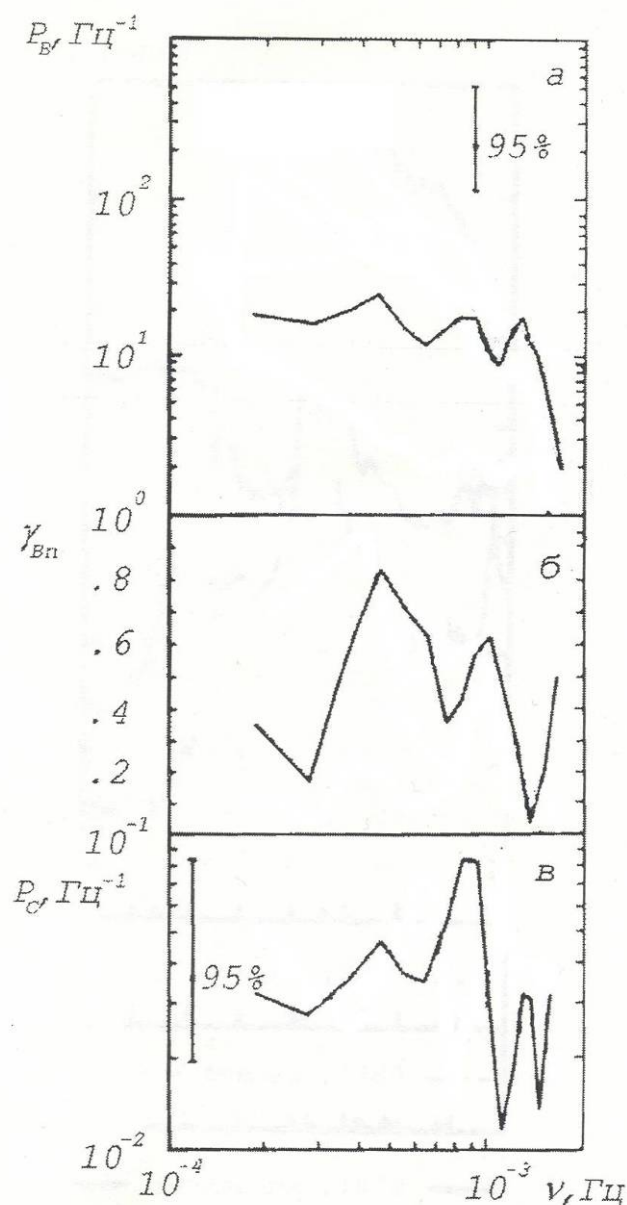


Рисунок 7 - Спектр мощности флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля (а), функции когерентности модуля межпланетного магнитного поля и концентрации плазмы солнечного ветра (б) и спектр мощности флуктуаций интенсивности КЛ (в). Кривые отвечают интервалу времени 13.30-21.35 UT 30 апреля 1978г. Указаны 95% доверительные интервалы.

В качестве примера, на рисунке 8 показана зависимость от времени числа солнечных пятен, интенсивности КЛ, зарегистрированной на станции Оулу и уровня флуктуаций КЛ (за него принималось значение средней мощности флуктуаций

интенсивности галактических КЛ за один солнечный оборот - 27 дней). Из рисунка 8 видно, что, действительно, уровень флуктуаций интенсивности КЛ испытывает 11-летнюю циклическую вариацию в фазе с солнечным циклом.

Результаты корреляционного анализа величин, представленных на рисунке 8, приведены в таблице 3. Анализ временных задержек в значениях функции корреляции (r) приводит к выводу, что наблюдаемая 11-летняя модуляция спектра флуктуаций интенсивности КЛ высоких энергий лучше отражает не пятнообразовательную деятельность, а корональную активность Солнца. Наиболее яркими и энергосодержащими проявлениями ее являются солнечные вспышки и выбросы корональной массы, максимальное число которых наблюдается на фазе спада солнечной активности, со значительной задержкой после максимума образования пятен на Солнце.

Изучение динамики флуктуаций интенсивности КЛ в магнитосфере Земли проводилось с использованием данных регистрации потоков протонов в области энергий $0.6 < E < 500$ МэВ на искусственных спутниках Земли серии GOES [9]. Информация о геостационарных космических аппаратах, энергетических каналах регистрации частиц и периодах работы каждого аппарата приведена в таблице 4.

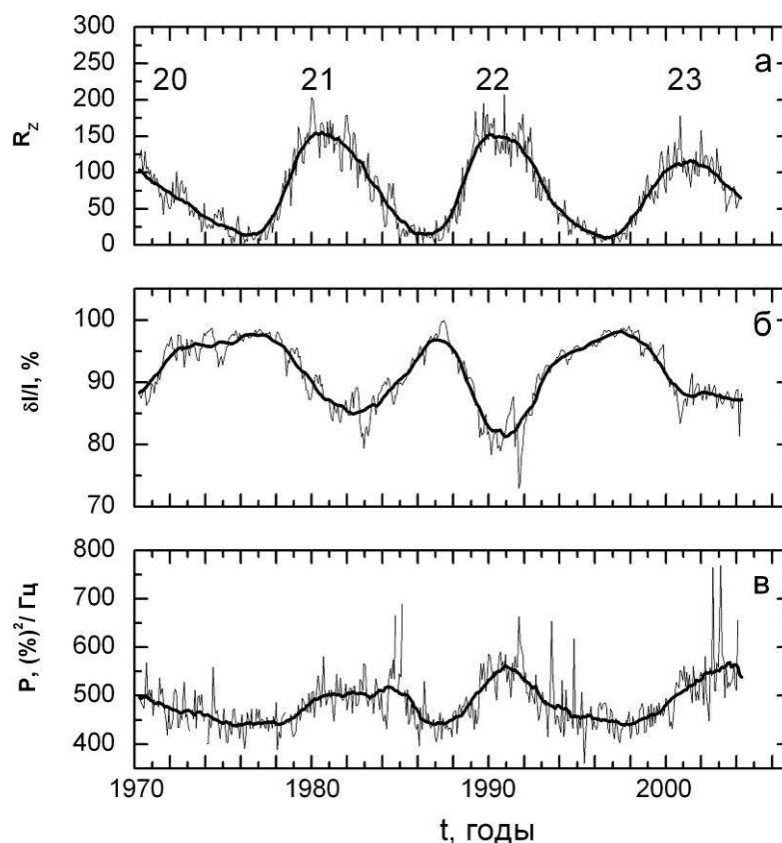


Рисунок 8 - Число солнечных пятен (а), интенсивность КЛ, зарегистрированная на станции Оулу (б) и уровень флуктуаций интенсивности КЛ (в) в зависимости от времени. Тонкие и жирные линии соответствуют 27-дневным и 2-х летним сглаженным значениям величин. Показаны номера солнечных циклов.

Таблица 3 - Коэффициенты взаимной корреляции и временные сдвиги (в оборотах Бартельса) между R_Z и P для различных станций КЛ. Уровень значимости $\alpha < 0.001$.

Станция КЛ	r	τ , оборот Бартельса
Бухта Тикси	0.69 ± 0.04	11
Оулу	0.58 ± 0.03	13
Калгари	0.65 ± 0.03	11
Кергелен	0.75 ± 0.04	5
Киль	0.67 ± 0.04	12
Ломницкий Штит	0.77 ± 0.03	0
Германус	0.85 ± 0.02	3
Рим	0.69 ± 0.05	6

На рисунке 9 показаны временные профили числа солнечных пятен (рисунок 9а), а также уровней флуктуаций КЛ в каналах P7 (рисунок 9б) и P1 (рисунок 9в), рассчитанные по данным космических аппаратах серии GOES. Из рисунка видно, что уровень флуктуаций высокоэнергичных КЛ (канал P7) в целом отражает изменения уровня солнечной активности и происходит в фазе с ним. Но в уровне флуктуаций низкоэнергичных частиц (канал P1) такой явной зависимости от цикла нет. Это расхождение связано с сильным влиянием магнитосферы Земли на флуктуации потока КЛ низких энергий.

Таблица 4 - Параметры дифференциальных энергетических каналов в экспериментах EPS/HEPAD по регистрации потоков КЛ на борту геостационарных космических аппаратов серии GOES.

Космический аппарат	Энергетические каналы, МэВ							Период работы
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
GOES 5	0.6-4.2	4.2-8.7	8.7-14.5	15-44	39-82	84-200	110-500	01.01.1986-31.03.1987
GOES 6	0.6-4.2	4.2-8.7	8.7-14.5	15-44	39-82	84-200	110-500	01.01.1986-31.12.1994
GOES 7	0.6-4.2	4.2-8.7	8.7-14.5	15-44	39-82	84-200	110-500	01.03.1987-31.08.1996
GOES 8	0.8-4.0	4-9	9-15	15-40	40-80	80-165	165-500	01.03.1995-16.06.2003

GOES 9	0.8- 4.0	4-9	9-15	15- 40	40- 80	80- 165	165- 500	01.04.1996- 31.08.1998
GOES 10	0.8- 4.0	4-9	9-15	15- 40	40- 80	80- 165	165- 500	01.07.1998- 31.12.2007
GOES 11	0.8- 4.0	4-9	9-15	15- 40	40- 80	80- 165	165- 500	01.07.2000- 30.09.2001 18.06.2003- 31.12.2007

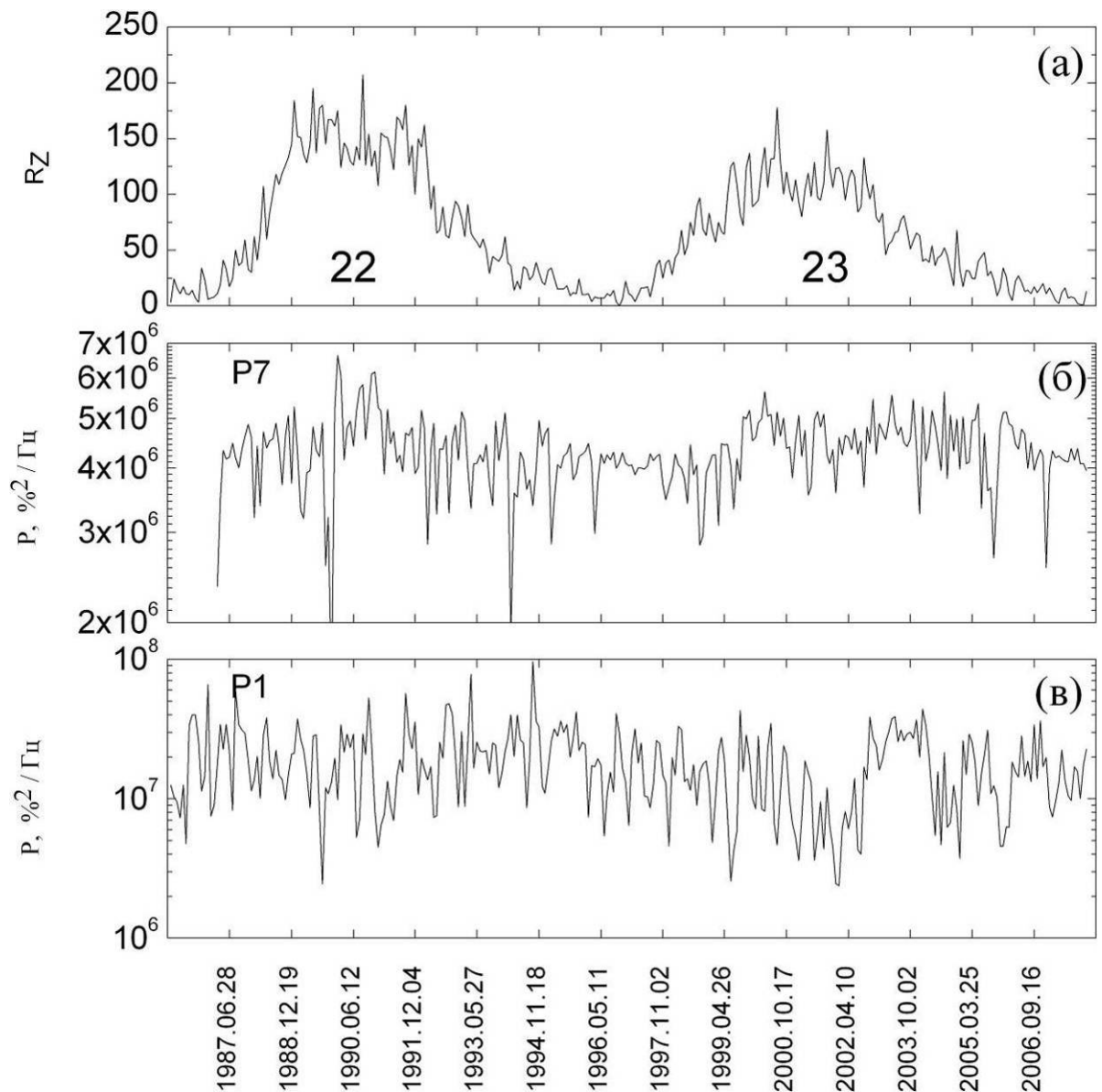


Рисунок 9 - Число солнечных пятен (а) и уровень флуктуаций КЛ в дифференциальных энергетических каналах P7 (165–600 МэВ) (б) и P1 (0.6–4.2 МэВ) (в) в зависимости от времени по измерениям на космических аппаратах серии GOES.

Для исследования динамики спектров флуктуаций КЛ в межпланетном пространстве использовались данные двух экспериментов по регистрации протонов, проводимых на борту 2-х космических аппаратов - IMP-8 (эксперимент CPME/Protons) и ACE (эксперимент EPAM/LEMS30) [9]. В таблице 5 приведены сведения об энергиях протонов, которые регистрировались в этих экспериментах.

На рисунке 10 а-г представлены результаты наблюдений числа солнечных пятен и интенсивности КЛ в канале регистрации P2 в эксперименте CPME/Protons на борту космического аппарата IMP-8, результаты расчетов индекса флуктуаций КЛ и показателя спектра за период 1974-2001 гг. Из рисунка видно, что поток КЛ ($E = 0.50 - 0.96$ МэВ) изменяется в фазе с циклом солнечной активности. Причем его локальные максимумы приходятся на фазы роста и спада цикла, что отражает связь с корональной активностью Солнца. Однако уровень флуктуаций КЛ в этой энергетической области находится в противофазе с солнечным циклом. Показатель спектра α изменяется от -0.5 до -1.75 также в противофазе с циклом солнечной активности.

Таблица 5 - Параметры дифференциальных энергетических каналов в экспериментах по регистрации потоков КЛ на борту космических аппаратов ACE и IMP-8.

ACE/EPAM/LEMS30	Энергия, МэВ	IMP-8/CPME	Энергия, МэВ
P1	0.047-0.065	P1	0.290-0.500
P2	0.065-0.112	P2	0.500-0.960
P3	0.112-0.187	P3	0.960-2.000
P4	0.187-0.310	P4	2.000-4.600
P5	0.310-0.580	P5	4.600-15.000
P6	0.580-1.060	P7	15.000-25.000
P7	1.060-1.910	P8	25.000-48.000
P8	1.910-4.750	P9	48.000-96.000
-	-	P10	96.000-145.000
-	-	P11	145.000-440.000

На рисунке 10 д-з приведена та же информация, но для высокоэнергетичного канала P11 ($E = 145 - 440$ МэВ). Их рисунка видно, что, в отличие от предыдущего случая, наблюдается картина, характерная для флуктуаций интенсивности КЛ высоких энергий, и обратная описанной выше. В этом случае вариации потока КЛ происходят в противофазе с циклом солнечной активности, а уровня флуктуаций КЛ - в фазе с ним. Показатель

спектра α изменяется обратно солнечному циклу весьма незначительно, варьируя около нуля.

Для установления количественной оценки степени связи наблюдаемых и рассчитанных характеристик КЛ с числом солнечных пятен в таблице 6 приведены коэффициенты кросс-корреляции между всеми изучаемыми параметрами. Из таблицы 6 следует, что между всеми параметрами существует линейная высокосвязанная связь. Проведенный анализ показывает существенное различие в поведении 11-летних вариаций уровня и спектрального индекса флуктуаций КЛ различных энергий. Условная граница между двумя популяциями частиц этих энергий находится в области ~ 100 МэВ.

Результаты анализа по измерениям на космическом аппарате ACE за 1997-2003 гг. подтверждают обнаруженную динамику флуктуаций интенсивности КЛ низких энергий в 11-летнем цикле солнечной активности [6, 11].

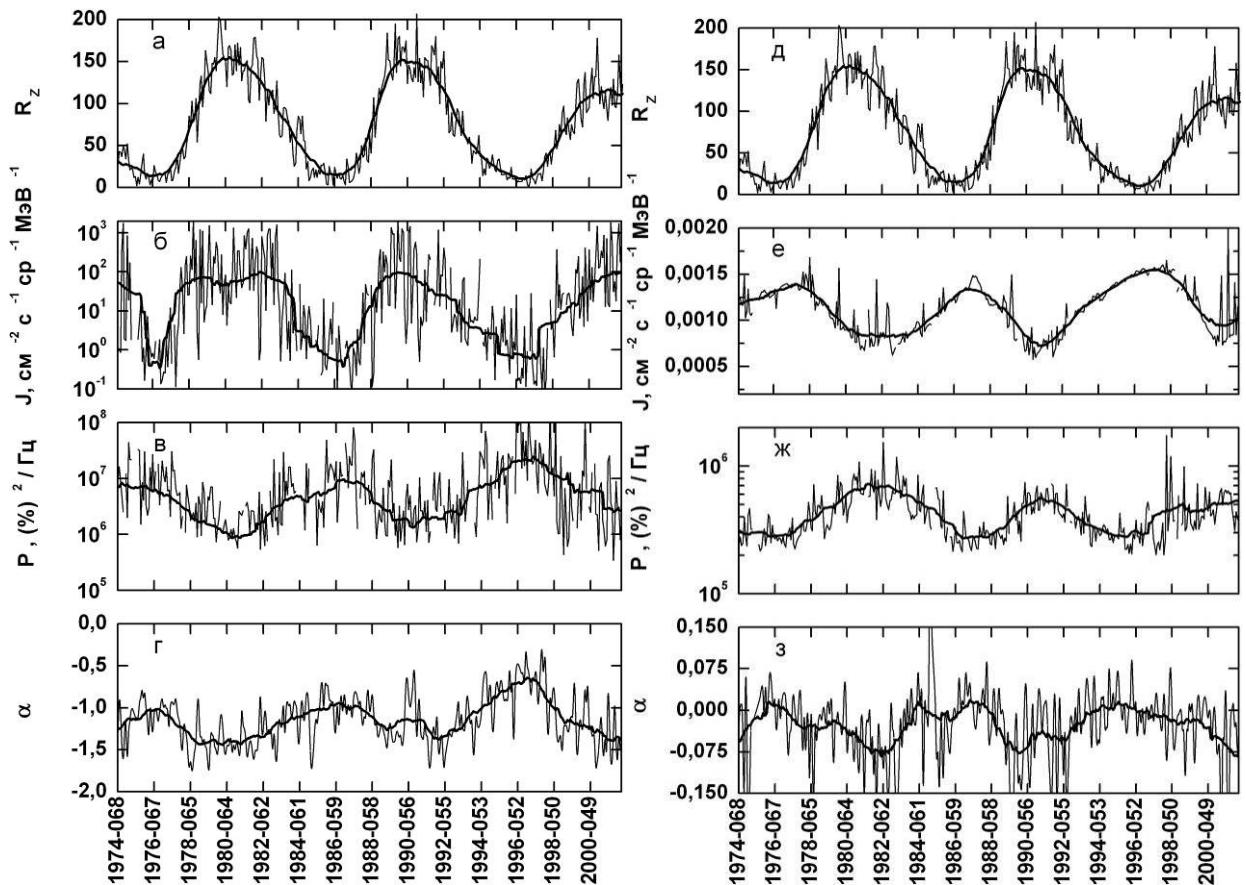


Рисунок 10 – Числа солнечных пятен (а) и (д), потоки КЛ по измерениям канала P2 (б) и P11 (е) в эксперименте CPME/Protons на борту космического аппарата IMP-8, соответствующие им индексы флуктуаций КЛ (в) и (ж), а также показатели спектров (г) и (з) в зависимости от времени. Жирные линии соответствуют 2-годовому сглаживанию. Время представлено в формате год-день года.

Таблица 6 - Коэффициенты кросс-корреляции между числом солнечных пятен (R_z), потоками КЛ (J), уровнем флуктуаций КЛ (P) и показателем спектра (α) для измерений в каналах регистрации низкоэнергичных (P2) и высокоэнергичных (P11) протонов в эксперименте CPME, проводившегося на космическом аппарате IMP-8 в 1974-2001гг. Уровень значимости $\alpha < 0.0001$.

Коррелируемые величины	Канал P2			Канал P11		
	J	P	α	J	P	α
R_z	0,84	-0,84	-0,78	-0,79	0,75	-0,79
J	-	-0,74	-0,83	-	-0,77	0,69
P	-	-	0,87	-	-	-0,70

В Главе 6 изучаются флуктуации межпланетного магнитного поля в 11-летнем солнечном цикле [10, 12-15]. Многочисленные измерения межпланетного магнитного поля на орбите Земли указывают на существование протяженного частотного спектра флуктуаций. Известно, что, в зависимости от уровня возмущенности межпланетной среды, спектры флуктуаций межпланетного магнитного поля подвержены значительным временным изменениям. Поскольку многие компоненты среды, определяющие ее состояние, изменяются в 11-летнем цикле солнечной активности, то возникает необходимость изучения соответствующих изменений и в уровне турбулентности солнечного ветра. Т.к. весь наблюдаемый спектр межпланетного магнитного поля условно можно разбить на три участка (энергетический, инерционный и диссипативный), свойства флуктуаций в которых различны [52], то можно предположить, что и причины, приводящие к предполагаемой эволюции с солнечным циклом каждого из них, должны быть различными.

В диссертации изучаются изменения на двух участках наблюдаемого спектра турбулентности солнечного ветра, которые могут модулировать потоки КЛ - энергетическом и инерционном, в области частот $2.2 \cdot 10^{-6} - 1.39 \cdot 10^{-4}$ и $10^{-4} - 1.67 \cdot 10^{-3}$ Гц, соответственно.

При анализе данных за 20-23 циклы солнечной активности установлено, что показатели спектров флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля, скорости и плотности солнечного ветра в энергетической области спектра турбулентности с началом 23-го цикла существенно изменяются по сравнению с многолетними средними величинами, и сохраняются таковыми в течение практически всего 23-го цикла [13, 14].

Для примера, на рисунке 11 приведены результаты измерений и спектральных оценок для модуля межпланетного магнитного поля. Из него видно, что величина модуля поля, наклон спектров и плотность энергии турбулентного межпланетного магнитного поля испытывают закономерные изменения с циклами активности. Однако с началом 23-го цикла показатель наклона спектров флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля значительно укрупняется, но при этом плотность энергии флуктуаций по сравнению с предыдущими циклами не изменяется, и по-прежнему варьирует около своего среднего значения $\sim 10^{-11}$ эрг/см³.

Полученные результаты свидетельствуют, что наблюдаемые свойства турбулентности солнечного ветра указывают на существование в течение всего 23-го солнечного цикла более регулярного межпланетного магнитного поля по сравнению с тремя предыдущими циклами. Это может быть связано с условиями истечения плазмы СВ с поверхности Солнца.

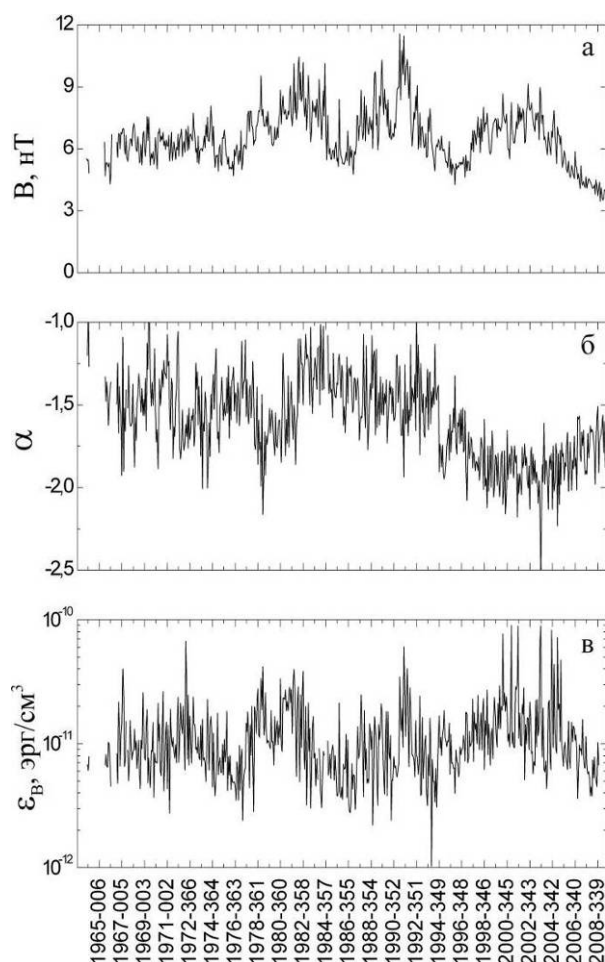


Рисунок 11 – Изменения модуля межпланетного магнитного поля (а), показателя наклона спектра (б) и плотности энергии флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля (в) в энергической области спектра турбулентности солнечного ветра в зависимости от времени. Время представлено в формате год-день года.

Инерционная часть спектра турбулентности солнечного ветра от начала фазы спада 21-го вплоть до фазы спада 22-го циклов солнечной активности изучалась на основе 5-мин измерений модуля межпланетного магнитного поля, выполненных на космическом аппарате IMP-8 [10, 12, 15]. Данные измерений, представленные на рисунке 12, показывают, что в рассматриваемый интервал времени существует тесная связь между 11-летним циклом солнечной активности и потоком низкоэнергичных частиц КЛ. Как следует из рисунка 12, на фазе спада 21-го (1981-1984 гг.), а также вблизи максимума и на фазе спада 22-го (1989-1991 гг.) циклов солнечной активности, наблюдаются повышенные частота и амплитуда потоков низкоэнергичных протонов. Из рисунка 12 также видно, что в течение цикла солнечной активности отмечаются значительные вариации уровня мелкомасштабной ($\sim 10^{10}$ см) турбулентности солнечного ветра (P_B), происходящие в фазе с 11-летним солнечным циклом. Характерно, что уровень турбулентности в отдельные интервалы времени резко повышается более чем на два порядка величины. Расчеты корреляционной матрицы, между представленными на рисунке 12 величинами, указывают на существование между ними тесной, статистически значимой связи (таблица 7). Однако, максимумы уровня турбулентности и потока низкоэнергичных КЛ не совпадают с максимумами 11-летних циклов солнечной активности, а приходятся на ветви их спада и роста. Более детальный анализ результатов, представленных на рисунке 12, показывает, что изменения в уровне турбулентности солнечного ветра имеют тенденцию лучше отражать не пятнообразовательную деятельность Солнца, а скорее его корональную активность, наиболее яркими проявлениями которой служат солнечные вспышки и выбросы корональной массы, т.е. явления, характеризующиеся процессами с большим энерговыделением, что на орбите Земли часто проявляется в виде повышенной частоты и амплитуды потоков КЛ, а также межпланетных ударных волн и выбросов корональной массы. Одной из возможных причин, приводящих к долговременной 11-летней изменчивости уровня флуктуаций межпланетного магнитного поля может быть генерация МГД-волн в окрестности орбиты Земли значительными потоками низкоэнергичных ($E_p \sim 0.01-10$ МэВ) частиц. Причем частицы КЛ могут быть как солнечного, так и межпланетного происхождения. В любом случае определяющим фактором является величина градиента и потока КЛ.

Таким образом, можно сделать вывод: поскольку частота появления значительных потоков низкоэнергичных КЛ напрямую связана с частотой крупномасштабных возмущений солнечного ветра, которая закономерно меняется в цикле солнечной

активности, то становится понятной природа явления 11-летней высокочастотной модуляции спектра флуктуаций межпланетного магнитного поля.

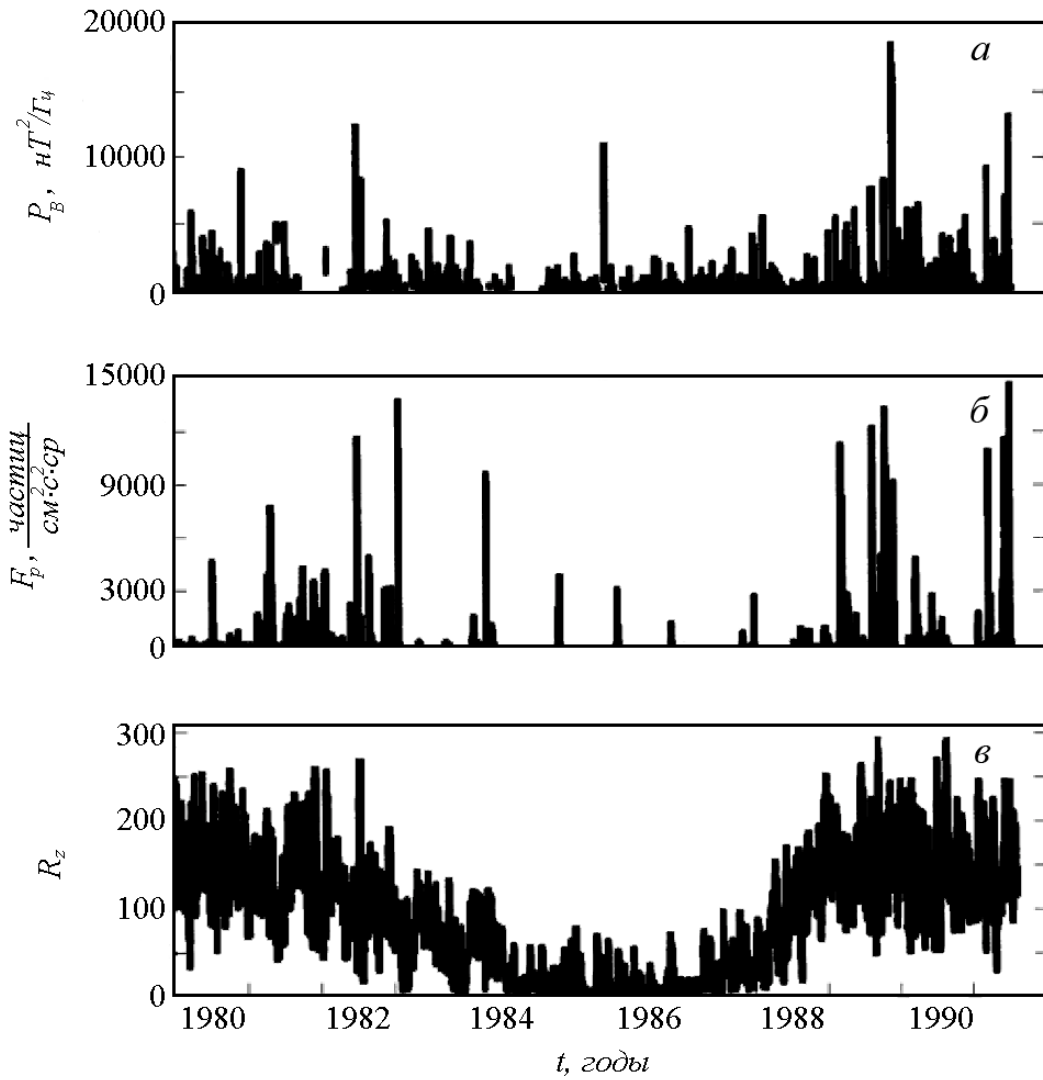


Рисунок 12 - Уровень мелкомасштабной турбулентности солнечного ветра P_B (а), поток протонов КЛ F_P с энергией $E_P > 1$ МэВ (б) и числа солнечных пятен R_Z (в) в зависимости от времени.

Таблица 7 - Коэффициенты взаимной корреляции r между числом солнечных пятен (R_Z), потоком протонов (F_P) с энергией $E_P > 1$ МэВ и уровнем мелкомасштабной турбулентности солнечного ветра (P_B). Уровень значимости $\alpha < 0.0005$.

Коррелируемые величины	R_Z	F_P	P_B
R_Z	1.00	0.60	0.44

F_p	-	1.00	0.51
P_B	-	-	1.00

В Главе 7 изучается поведение жесткостных спектров эффектов Форбуша с циклами солнечной активности [13, 16]. Наблюдения на мировой сети станций КЛ показывают, что энергетический спектр эффектов Форбуша изменяется от события к событию, отражая динамические процессы, происходящие в солнечном ветре. Для изучения характеристик форбуш-понижений в диссертации использовались данные 13 станций мировой сети нейтронных мониторов с порогами геомагнитного обрезания от 0 до 13.45 ГВ (таблица 8). К анализу также привлекались данные регистрации Якутского спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина, который имеет в своем составе нейтронный монитор и 4 мюонных телескопа, размещенных на разных уровнях 0, 7, 20 и 60 м водного эквивалента (м в.э.). Спектрограф позволяет регистрировать частицы КЛ с энергиями от ~2 до 300 ГэВ [13, 16-18].

Таблица 8 - Характеристики станций КЛ, оснащенных нейтронными мониторами.

№	Станция	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Геомагнитный порог, ГВ
1.	Туле	76.60N	68.80W	260	0.00
2.	Алерт	82.5N	62.33W	57	0.00
3.	Дип Ривер	46.1N	77.5W	145	1.02
4.	Якутск	62.02N	129.72E	105	1.65
5.	Москва	55.47N	37.72E	200	2.46
6	Даллас	32.94N	96.73W	208	4.35
7.	Рим	41.90N	12.50E	60	6.32
8.	Алма-Ата	43.25N	76.92E	775	6.69
9.	Ташкент	41.33N	69.62E	565	8.34
10.	Пекин	33.25N	35.47E	1013	10.42
11.	Токио	35.75N	139.72E	20	11.61
12.	Халеакала	20.72N	156.27W	3052	13.30
13.	Уанкайо	12.03S	75.33W	3400	13.45

На рисунке 13а приведены среднегодовые числа солнечных пятен, а также результаты расчетов показателя энергетического спектра форбуш-понижений по данным

нейтронных мониторов (рисунок 13б) и мюонных телескопов Якутского спектрографа КЛ (рисунок 13в). Из рисунка видно, что показатель энергетического спектра эффектов Форбуша изменяется с периодичностью 11 лет в зависимости от фазы цикла. Однако с началом 23-го цикла наблюдается уменьшение (примерно в 1.5 раза) показателя спектра γ , которое сохраняется в течение всего 23-го цикла. Это следует как из измерений нейтронных мониторов, так и мюонных телескопов, что повышает достоверность обнаруженного ужесточения спектра форбуш-понижений в прошедшем цикле солнечной активности. Значения показателя жесткостного спектра γ изменяются в пределах от -0.4 до -1.0. При этом какой-либо зависимости показателя жесткостного спектра форбуш-понижений от гелиокоординат солнечных вспышек, источников крупномасштабных возмущений солнечного ветра и скорости распространения межпланетных ударных волн не обнаруживается [18].

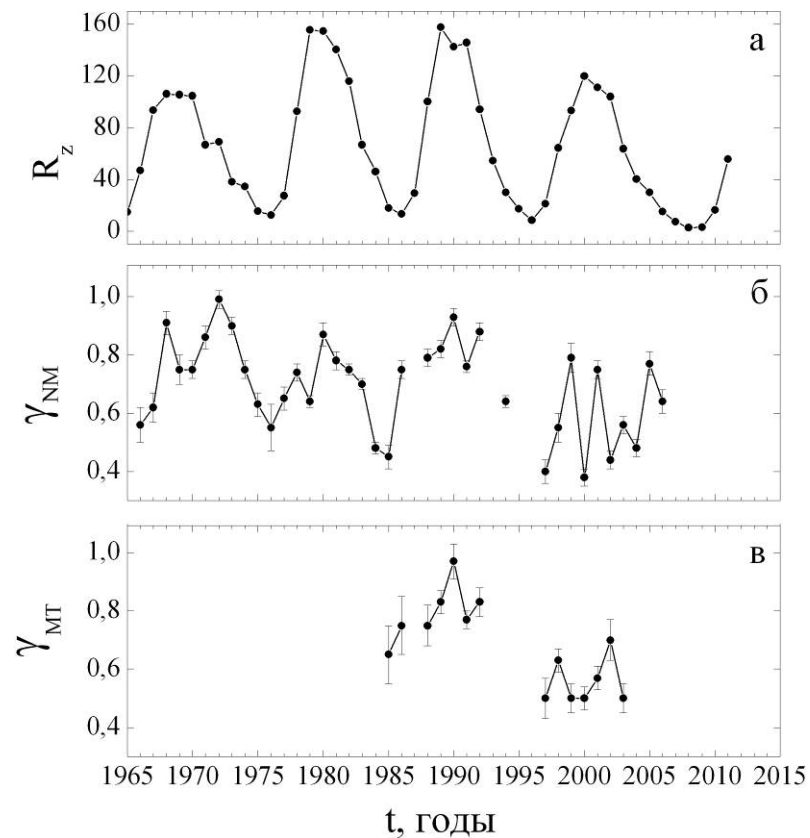


Рисунок 13 - Число солнечных пятен R_z (а), показатель энергетического спектра форбуш-понижений по данным сети нейтронных мониторов γ_{NM} (б) и мюонных телескопов γ_{MT} (в) Якутского спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина в зависимости от времени в 20-23 циклах солнечной активности. Приведены статистические ошибки измерений.

Проведенный анализ показал, что ответственным за 11-летние изменения спектров понижений КЛ является уровень турбулентности солнечного ветра. Между величиной энергии турбулентного магнитного поля и показателем жесткостного спектра существует тесная статистическая связь, коэффициент корреляции $r = 0.53 \pm 0.08$ с уровнем достоверности не менее 97.5%. Это свидетельствует о том, что более регулярное межпланетное магнитное поле обуславливает понижения интенсивности КЛ с более жестким спектром. Это означает, что роль пробочного механизма в формировании эффектов Форбуша в минимуме солнечной активности преобладает над диффузионным [53]. Можно также сделать вывод, что этот механизм ответственен и за формирование понижений КЛ в течение всего прошедшего 23-го солнечного цикла.

Глава 8 посвящена реализации метода прогноза космической погоды по измерениям флуктуаций интенсивности КЛ в межпланетной среде. Основываясь на выводах главы 4, для выработки прогноза используются данные измерений КЛ, проводящихся на борту космического аппарата ACE. Эти данные находятся в открытом доступе на сервере Space Weather Prediction Center (SWPC) по адресу: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists/ace.html>. Хотя SWPC не поощряет использование предварительных данных для научно-исследовательских целей, т.к. они могут содержать ошибки и сбои, тем не менее, автор использует их, при этом осознавая и принимая на себя все риски работы с данными в режиме реального времени.

Из всего набора данных, регистрируемых на космическом аппарате ACE, автор использует только измерения величины модуля межпланетного магнитного поля B_t , плотности (n) и потоковой скорости солнечного ветра (U), а также данные регистрации потоков протонов (J) в пяти дифференциальных энергетических каналах от 0.047 до 1.900 МэВ. Поскольку амплитуда флуктуаций мала для всех анализируемых величин, то для их выделения применяются стандартные методы спектрального анализа. Согласно полученным результатам работ [38-42], перед приходом на орбиту Земли квазипараллельных межпланетных ударных волн в широком диапазоне энергий от ~ 10 кэВ до ~ 1 ГэВ регистрируются когерентные флуктуации КЛ. Обнаружение таких флуктуаций КЛ с величиной когерентности более 0.8 на различных частотах в разных каналах регистрации позволяет выработать прогноз прихода на орбиту Земли квазипараллельных межпланетных ударных волн. Проводимый с 2007 г. в режиме реального времени непрерывный эксперимент показал, что достоверность прогноза составляет $\approx 70\%$ с заблаговременностью 1-2 суток.

Проведенный анализ показывает, что на основе предложенного автором метода можно прогнозировать приход только тех межпланетных ударных волн, перед фронтами которых регистрируются значительные потоки низкоэнергичных КЛ ($E \sim 1$ МэВ). Как правило, эти ударные волны являются квазипараллельными и на их фронтах возможен эффективный процесс ускорения низкоэнергичных частиц. При наличии значительного потока частиц с большими пространственными градиентами они в состоянии генерировать МГД- турбулентность перед фронтом ударной волны [54-56], в том числе и ветвь быстрых магнитозвуковых волн. Последние приводят к модуляции КЛ в широкой области энергий ($E \sim 10$ кэВ - ~ 1 ГэВ), что в экспериментах на Земле и в космосе регистрируется как возникновение флуктуаций КЛ.

В качестве примера на рисунке 14 показан пример прогноза прихода к Земле межпланетной ударной волны 24 октября 2011 г. Возникновение когерентных флуктуаций интенсивности КЛ в дифференциальных каналах P2-P5 (регистрирующих протоны с энергиями 115-195 и 1080-1900 МэВ) позволило выработать прогноз приближения к Земле межпланетной ударной волны около 19.00 UT 22 октября 2001 г. Приход сильной ударной волны на космический корабль ACE был зарегистрирован в 17.49 UT 24 октября 2011 г. Таким образом, за время почти 2 суток было сделано предсказание прихода крупномасштабного возмущения солнечного ветра на орбиту Земли.

В настоящее время методика совершенствуется, результаты прогноза в режиме реального времени выводятся в Интернет, они доступны на сайте ИКФИА СО РАН по адресу: http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/ace_spaceweather_real_time.html

В **заключении** приводятся основные результаты, полученные в диссертации. В частности, указывается, что проведено сравнение результатов расчета спектральных характеристик флуктуаций КЛ с предсказаниями теории, получены доказательства магнитозвуковой природы флуктуаций интенсивности КЛ и установлена связь уровня флуктуаций КЛ и межпланетного магнитного поля с 11-летним солнечным циклом. А также показана возможность практического использования флуктуаций КЛ для целей прогноза космической погоды.

Основные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом.

1. Предложен и создан новый комплекс приборов для регистрации мюонов, рожденных при взаимодействии КЛ с атмосферой Земли - сцинтилляционных мюонных телескопов, которые позволяют регистрировать частицы, приходящие из 13 направлений, что значительно дополняет возможности якутского спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина и позволяет существенно расширить круг научных задач;

2. Установлена природа флуктуаций интенсивности КЛ. На основе данных прямых измерений межпланетного магнитного поля и плазмы солнечного ветра в околоземном космическом пространстве получены доказательства возникновения когерентных флуктуаций интенсивности КЛ в широкой области энергий (от десятков кэВ до нескольких ГэВ) во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Установлено, что механизм модуляции КЛ обусловлен их взаимодействием с быстрыми магнитозвуковыми волнами в отличие от альфвеновских;
3. Показано, что в области перед фронтами квазипараллельных межпланетных ударных волн существует протяженная область размерами ~ 0.1 а.е. повышенного уровня МГД-турбулентности солнечного ветра, которая генерируется КЛ, ускоренными на фронтах межпланетных ударных волн. При этом максимальный уровень турбулентности наблюдается непосредственно перед ударным фронтом и его величина сравнима с плотностью энергии невозмущенного крупномасштабного межпланетного магнитного поля;
4. Установлено новое, ранее не известное явление – 11-летняя модуляция спектра флуктуаций интенсивности КЛ. Причем уровень флуктуаций интенсивности КЛ высоких энергий изменяется в фазе, а низких - в противофазе с солнечным циклом. Условная граница между КЛ разных энергий находится в области ~ 100 МэВ;
5. Установлено, что уровень флуктуаций межпланетного магнитного поля в энергетическом и инерционном участках спектра турбулентности солнечного ветра претерпевают изменения в фазе с 11-летним циклом солнечной активности. Показано, что, по сравнению с тремя предыдущими солнечными циклами, в течение всего 23-го цикла имело место более регулярное межпланетное магнитное поле с характерным масштабом $\sim 10^{12}$ см. Приведены аргументы в пользу механизма генерации мелкомасштабной ($\sim 10^{10}$ см) МГД-турбулентности солнечного ветра потоками низкоэнергичных ($E_p \sim 0.01-10$ МэВ) частиц солнечного и межпланетного происхождения, которые имеют соответствующее распределение по частоте в 11-летнем солнечном цикле;

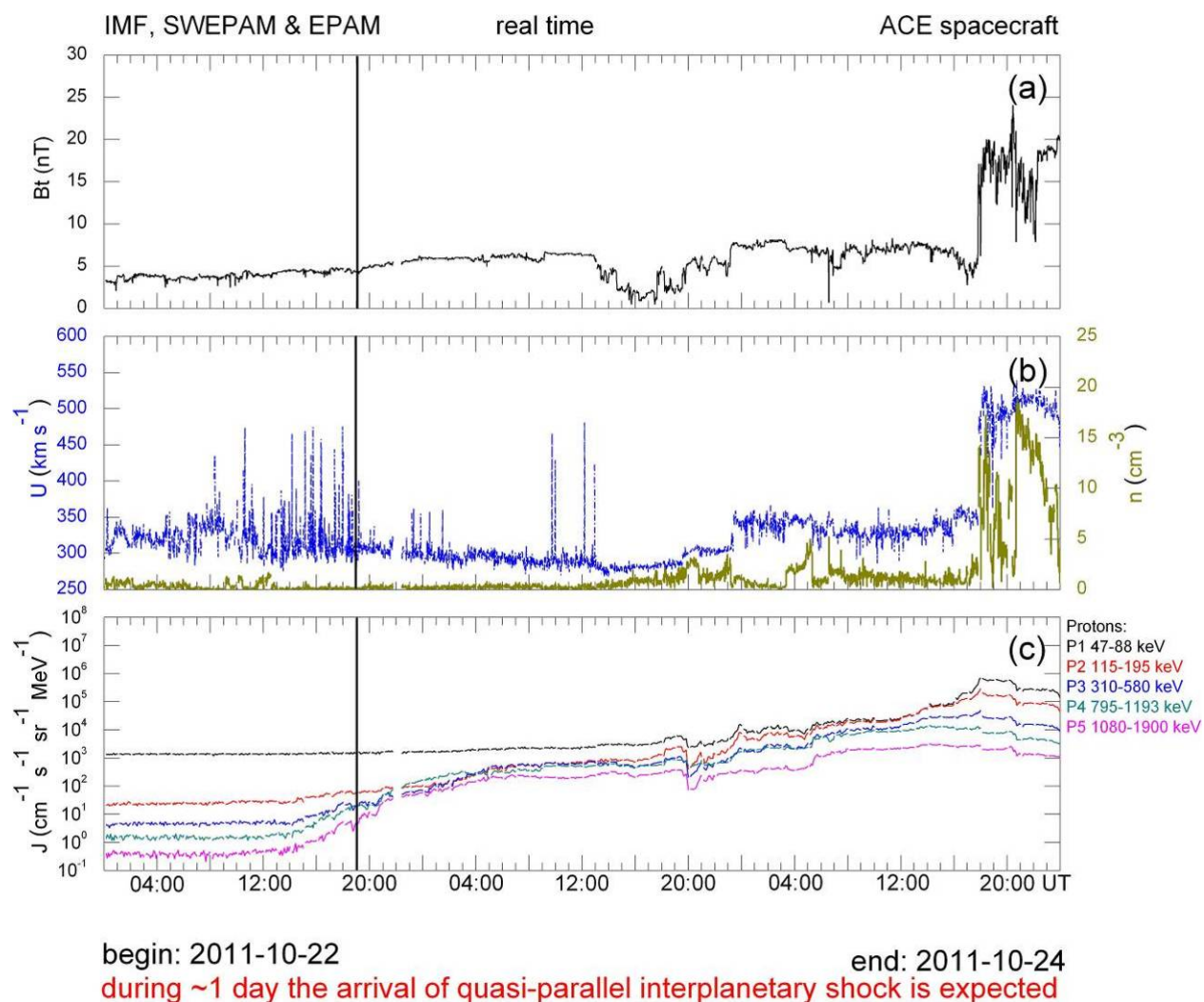


Рисунок 14 - Модуль межпланетного магнитного поля (a), скорость и плотность солнечного ветра (b) и потоки КЛ по измерениям в 5 дифференциальных энергетических каналах в эксперименте EPAM/LEMS120 на борту космического аппарата ACE как функция времени во время регистрации на орбите Земли межпланетной ударной волны 24 октября 2011 г. Вертикальной линией показано время выработки прогноза. Подпись внизу рисунка появляется в случае возникновения когерентных флуктуаций интенсивности КЛ в различных энергетических каналах и предупреждает о приближении крупномасштабного возмущения солнечного ветра.

6. Показано, что наблюдаемые 11-летние изменения жестких спектров эффектов Форбуша связаны с соответствующими вариациями спектра турбулентности солнечного ветра в циклах солнечной активности. Установлено, что в 23-м солнечном цикле спектры форбуш-понижений являются существенно более жесткими, чем в трех предыдущих циклах;

7. На основе измерений флуктуаций интенсивности КЛ в околоземном космическом пространстве создан и реализован метод прогноза прихода на орбиту Земли крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Достоверность метода составляет $\approx 70\%$ с заблаговременностью прогноза около 1-2 суток.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бережко, Е.Г. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей / Е.Г.Бережко, С.А.Стародубцев // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1988. – Т.52. – С.2361-2363.
2. Транский, И.А. Поляризационные параметры крупномасштабной турбулентности солнечного ветра и флуктуации интенсивности космических лучей / И.А.Транский, С.А.Стародубцев // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т.31. – С.27-33.
3. Стародубцев, С.А. Флуктуации интенсивности космических лучей и межпланетного магнитного поля в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью / С.А.Стародубцев, И.А.Транский, М.И.Веригин, Г.А.Котова // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т.36. – С.134-138.
4. Grigoryev, A.V. Fluctuations of cosmic rays and IMF in the vicinity of interplanetary shocks / A.V.Grigoryev, S.A.Starodubtsev, V.G.Grigoryev, I.G.Usoskin, K.Mursula // Adv. Space Res. – 2008. – V.41. – P.955-961.
5. Стародубцев, С.А. Флуктуации космических лучей и межпланетного магнитного поля в окрестности фронтов межпланетных ударных волн / С.А.Стародубцев, А.В.Григорьев, В.Г.Григорьев, И.Г.Усоскин, К.Мурсула // Изв. РАН. Сер. физ. – 2007. – Т.71. – С.1022-1024.
6. Григорьев, А.В. Флуктуации космических лучей по измерениям на космических аппаратах в цикле солнечной активности / А.В.Григорьев, С.А.Стародубцев, И.Г.Усоскин, К.Мурсула // Вестник ЯГУ им. М.К. Аммосова. – 2006. – Т.3. – №1. – С.42-47.
7. Бережко, Е.Г. Спектр флуктуаций интенсивности космических лучей в цикле солнечной активности / Е.Г.Бережко, И.А.Бревнова, С.А.Стародубцев // Письма в Астрон. журн. – 1993. – Т.19. – №8. – С.749-752.
8. Starodubtsev, S.A. Rapid Cosmic Ray Fluctuations: Evidence for Cyclic Behaviour / S.A.Starodubtsev, I.G.Usoskin, K. Mursula // Solar Phys. – 2004. – V.224. – №1-2. – P.335-343.
9. Стародубцев, С.А. Флуктуации потока энергичных частиц в цикле солнечной активности по измерениям в солнечном ветре, в магнитосфере и на земле / С.А.Стародубцев, И.Г.Усоскин // Письма в Астрон. журн. – 2010. – Т.36. – С.462-467.

10. Starodubtsev, S.A. A Study of the IMF Fluctuation Spectrum in the Frequency Range $10^{-4} - 1.67 \cdot 10^{-3}$ Hz during Solar Activity Cycle Development / S.A.Starodubtsev // Physics and Chemistry of the Earth, Part C. – 2000. – №1-2. – P.133-136.
11. Starodubtsev, S.A. Long-term modulation of the cosmic ray fluctuation spectrum / S.A.Starodubtsev, I.G.Usoskin, A.V.Grigoryev, K.Mursula // Ann. Geophys. – 2006. – V.24. – P.779–783.
12. Стародубцев, С.А. Мелкомасштабная турбулентность солнечного ветра в 11-летнем цикле солнечной активности / С.А.Стародубцев // Письма в Астрон. журн. – 1999. – Т.25. – С.626-630.
13. Стародубцев, С.А. Космические лучи и турбулентность солнечного ветра: особенности 23-го цикла солнечной активности / С.А.Стародубцев, В.Г.Григорьев // Солнечно-земная физика. – 2011. – Вып. 17. – С.86-91.
14. Starodubtsev, S.A. Cosmic Rays and Solar Wind Turbulence: Peculiarities of the 23rd Solar Cycle / S.A.Starodubtsev, V.G.Grigoryev // Geomagnetism and Aeronomy. – 2011. – V.51. – №7. – P.1004-1009.
15. Стародубцев, С.А. Спектр флуктуаций межпланетного магнитного поля в 11-летнем цикле солнечной активности / С.А.Стародубцев // Астрон. вестник. – 2000. – Т.34. – С.121-125.
16. Григорьев, В.Г. Временные изменения энергетического спектра форбуш-понижений в 20–23 циклах солнечной активности / В.Г.Григорьев, С.А.Стародубцев // Изв. РАН. Сер. физ. – 2011. – Т. 75. – С.850-853.
17. Grigoryev, V.G. Modern Yakutsk cosmic ray spectrograph after A.I. Kuzmin / V.G.Grigoryev, S.A.Starodubtsev, G.F.Krymsky, P.A.Krivoshapkin, V.E.Timofeev, A.N.Prihodko, A.Ya.Karmodonov // Proc. 32-nd ICRC. Beijing, China, August 11-18, 2011. – V.11. – P.257-260.
18. Герасимова, С.К. Изменение жесткостного спектра форбуш-понижений с циклами солнечной активности / С.К.Герасимова, В.Г.Григорьев, П.А.Кривошапкин, Г.В.Скрипин, С.А.Стародубцев // Астрон. вестник. – 2000. – Т.34. – С.283-285.
19. Стародубцев, С.А. Динамика спектров флуктуаций космических лучей перед солнечными протонными вспышками и форбуш понижениями / С.А.Стародубцев // Геомагнетизм и аэрномия. – 1985 – Т.25. – С.997-1000.
20. Стародубцев, С.А. Пульсации космических лучей перед солнечными протонными вспышками по данным наземных наблюдений / С.А.Стародубцев, А.Т.Филиппов, Н.П.Чирков // Астрон. журн. – 1982. – Т.59. – Вып.6. – С.1229-1230.

21. Стародубцев, С.А. О спектре флуктуаций интенсивности космических лучей и ММП во время солнечной вспышки 28 января 1967 г. / С.А.Стародубцев, А.Т.Филиппов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1986. – Т.26. – №5. – С.827-830.
22. Turpanov, A.A. The Automatized System for the Collection, Treatment and Analysis of Neutron Monitor Data in Real-Time / A.A.Turpanov, S.A.Starodubtsev, V.G.Grigoryev et al. // Proc. 27-th ICRC. Hamburg, Germany, 7-15 August 2001. –V.6. – P.2325-2328.
23. Kozlov, V. REal-time COsmic Ray Database (RECORD) / V.Kozlov, L.Ksenofontov, K.Kudela, S.Starodubtsev et al. // Proc. 28th ICRC. Tsukuba, Japan, July 31-August 7, 2003. – V.6/7. – P.3473-3476.
24. Kozlov, Valery. Neutron Monitor Data Base in Real Time / Valery Kozlov, Karel Kudela, Sergei Starodubtsev et al. // Proc. of ISCS 2003 “Solar Variability as an Input to the Earth’s Environment”, 23-28 June 2003. Tatranska Lomnika, Slovak Republic. – Noordwijk, The Netherlands : Ed. A. Wilson, ESA Publ. Division, 2003. – P.675-678.
25. Starodubtsev, S. Real-Time Cosmic Ray Distributed (RECORD) database: A status report / S.Starodubtsev, A.Turpanov, K.Kudela et al. // Proc. 29th ICRC. Pune, India, August 3–10, 2005. –V.2. – P.465-468.
26. Стародубцев, С.А. Эффект изотропизации флуктуаций галактических космических лучей во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра / С.А.Стародубцев, В.И.Козлов, К.Кудела // Геомагнетизм и аэрономия. – 1999. – Т.39. – С.104-107.
27. Стародубцев, С.А. Распределение МГД-турбулентности в окрестности переднего фронта крупномасштабных возмущений солнечного ветра / С.А.Стародубцев, Л.П.Шадрин // Геомагнетизм и аэрономия. – 1998. – Т.38. – С.9-15.
28. Usoskin, I.G. Galactic Cosmic Ray Fluctuations: Long-term Modulation of Power Spectrum / I.G.Usoskin, S.A.Starodubtsev // Proc. 28th ICRC. Tsukuba, Japan, July 31-August 7, 2003. – V.7. – P.3905-3908.
29. Starodubtsev, S.A. Long-Term Modulation of the Galactic Cosmic-Ray Fluctuation Spectrum / S.A.Starodubtsev and I.G.Usoskin // Astron. Lett. – 2003. –V.29. – P.594–598.
30. Krainev, M.B. The Gnevyshev Gap Effect in Galactic Cosmic Rays / M.B.Krainev, M.Storini, G.A.Bazilevskaya, E.O.Fluckiger, V.S.Makhmutov, A.I.Sladkova, S.A.Starodubtsev // Proc. 26-th ICRC. Salt Lake City, USA, 17-25 August, 1999. – V.7. – P.155-158.
31. Турпанов, А.А. Программное обеспечение для работы с базой данных космических лучей / А.А.Турпанов, С.А.Стародубцев // Вычислительные технологии. – 2010. – Т.15. – С.103-110.

32. Shadrina, L.P. Geomagnetic storms and Forbush Decreases during the passage of the Earth through the flanks of Large-scale solar wind disturbances / L.P.Shadrina, S.A.Starodubtsev, I.Ya.Plotnikov // International Journal of Geomagnetism and Aeronomy. – 2002. – V.3. – P.45-50.

33. Plotnikov, I.Ya. Manifestation of shock wave orientation in the cosmic ray intensity and geomagnetic field decrease / I.Ya.Plotnikov, S.A.Starodubtsev, L.P.Shadrina, V.E.Timofeev // Proc. 27-th ICRC. Hamburg, Germany, 7-15 August 2001. – V.9. – P. 3624-3626.

34. Starodubtsev, S.A. Long-Term Modulation of the Cosmic Ray Fluctuation Spectrum: Spacecraft Measurements / S.A.Starodubtsev, I.G.Usoskin, A.V.Grigoryev, K.Mursula // Proc. 29th ICRC. Pune, India, 3 – 10 August 2005. – Pune, 2005. – V.2. – P. 247-250.

35. Starodubtsev, S. Solar cycle variation of rapid fluctuations of energetic particles at the geostationary orbit [Электронный ресурс] / S.Starodubtsev, I.Usoskin, K.Mursula // Proc. 31st ICRC. Łódź, Poland, July 7-15, 2009. – Режим доступа: <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc0194.pdf>

36. Timofeev, V.E. Dynamics of the Solar Energetic Particles in the Presence of a Shock Wave / V.E.Timofeev, I.S.Petukhov, S.I.Petukhov, S.A.Starodubtsev // Proc. 28th ICRC. Tsukuba, Japan, July 31-August 7, 2003. – V.6/7. – P. 3623-3626.

37. Петухов, И.С. Диффузионное распространение быстрых частиц в присутствии движущейся ударной волны / И.С.Петухов, С.И.Петухов, С.А.Стародубцев, В.Е.Тимофеев // Письма в Астрон. журн. – 2003. – Т.29. – С.742-751.

38. Starodubtsev, S.A. Arrival of an Interplanetary Shocks at the Earth: a Real-Time Forecast Based on ACE Spacecraft Data / S.A.Starodubtsev, V.G.Grigoryev, I.G.Usoskin, K.Mursula // Proc. 32-nd ICRC. Beijing, China, 11-18 August, 2011. –V.11. – P.291-294.

39. Starodubtsev, S.A. Forecast of the arrival of interplanetary shocks by measuring cosmic ray fluctuations in the interplanetary medium [Электронный ресурс] / S.A. Starodubtsev, V.G.Grigoryev, I.G.Usoskin // Proc. 23rd European Cosmic Ray Symposium (and 32nd Russian Cosmic Ray Conference). Moscow, Russia, July 3 – 7, 2012. sh_525. – Режим доступа: <http://dec1.sinp.msu.ru/~ecrs2012pub>.

40. Starodubtsev, S.A. Rapid cosmic ray fluctuations in real-time during the SEP events in December 2006 / S.A. Starodubtsev, A.V. Grigoryev, I.G. Usoskin, K. Mursula. // Proc. 30th ICRC. Merida, Mexico. 3-11 July, 2007. – V.1 (SH). – P.135-138.

41. Starodubtsev, S.A. Forecast of the arrival of interplanetary shocks by measuring cosmic ray fluctuations in the interplanetary medium / S.A.Starodubtsev, V.G.Grigoryev and I.G.Usoskin // J. Phys.: Conf. Ser. – 2013. – V.409. – 012180.

42. Григорьев, А.В. Флуктуации космических лучей в режиме реального времени во время событий СКЛ в декабре 2006 г. / А.В.Григорьев, С.А.Стародубцев, И.Г.Усоскин, К.Мурсула // Сб. докладов Всерос. конф. Современные проблемы космической физики. Якутск, 26-28 ноября 2007 г. – Якутск: Изд-во Якутского научного центра СО РАН, 2007. – С.127-130.

43. Григорьев, В.Г. Приемные векторы комплекса мюонных телескопов станции Якутск / В.Г.Григорьев, П.А.Кривошапкин, Г.Ф.Крымский, В.П.Мамрукова, С.А.Стародубцев, М.Э.Дьячковский // Сб. докладов Всерос. конф. Современные проблемы космической физики. Якутск, 26-28 ноября 2007 г. – Якутск: Изд-во Якутского научного центра СО РАН, 2007. – С.99-102.

44. Chuprova, V.P. The brief history of experimental research of cosmic ray variations in Yakutia / V.P.Chuprova, S.K.Gerasimova, V.G.Grigoryev, P.A.Krivoshapkin, G.F.Krymsky, V.P.Mamrukova, V.M.Migunov, A.N.Prihodko, G.V.Shafer, G.V.Skripin, Ye.Ye.Sorokin, S.A.Starodubtsev, V.E.Timofeev // Adv. Space Res. – 2009. – V.44. – P.1200-1206.

45. Shadrina, L.P. Forbush decreases in the absence of geomagnetic storms / L.P.Shadrina, I.Ya.Plotnikov, S.A.Starodubtsev // In Proc. 9th International Conference «Problems of geocosmos». St. Petersburg, Petrodvorets, October 8-12, 2012. – Saint-Petersburg 2012. – P.387-391.

46. Shadrina, L.P. Large-scale solar wind disturbances as a reason of intense geomagnetic storms / L.P.Shadrina, E.S.Barkova, I.Ya.Plotnikov, S.A.Starodubtsev // In Proc. 9th International Conference «Problems of geocosmos». St. Petersburg, Petrodvorets, October 8-12, 2012. – Saint-Petersburg 2012. – P.381-386.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

47. Owens, A.J. An Algorithm for Generating Fluctuations Having Any Arbitrary Power Spectrum / A.J.Owens // J.Geophys.Res. – 1978. – V.83. – №A4. – P.1673-1675.

48. Owens, A.J. Cosmic-ray scintillations .2. General Theory of Interplanetary Scintillations / A.J.Owens // J. Geophys. Res. – 1974. – V.79. – P.895-906.

49. Дорман, Л.И. Короткопериодические вариации интенсивности космических лучей / Л.И.Дорман, И.Я.Либин // Успехи физич. наук. – 1985. – Т.145. – С.403-440.

50. Owens, A.J. Cosmic-ray scintillations .3. The Low-Frequency Limit and Observations of Interplanetary Scintillations / A.J.Owens, J.R.Jokipii // J. Geophys. Res. – 1974. – V.79. – P.907-919.

51. Топтыгин, И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях / И.Н.Топтыгин. – М.: Наука, 1983. – 304 с.

52. Коваленко, В.А. Солнечный ветер / В.А.Коваленко. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
53. Крымский, Г.Ф. Космические лучи и солнечный ветер / Г.Ф.Крымский [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1981. – 224 с.
54. Бережко, Е.Г. Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами / Е.Г.Бережко // Письма в Астрон. журн. – 1986. – Т.12. – С.842-847.
55. Бережко, Е.Г. Генерация МГД-волн в межпланетной плазме потоками солнечных космических лучей / Е.Г.Бережко // Письма в Астрон. журн. – 1990. – Т.16. – С.1123-1132.
56. Бережко, Е.Г. Генерация космических лучей ударными волнами / Е.Г.Бережко, В.К.Елшин, Г.Ф.Крымский, С.И.Петухов. – Новосибирск: Наука, 1988. – 184с.