

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИЗМИРАН,
д.ф.-м.н.
В.Д.Кузнецов



24 марта 2014 г.

Отзыв ведущей организации
на диссертацию Стародубцева С.А.

"Флуктуации интенсивности космических лучей в 11-летнем цикле
солнечной активности",
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.03.03 - Физика Солнца.

Целью диссертационной работы Стародубцева С.А. является исследование флуктуаций интенсивности космических лучей (КЛ), наблюдаемых на Земле, и их связь с параметрами межпланетной среды.

Актуальность выполненной работы. Исследования вариаций интенсивности космических лучей, выполненные ранее, 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 меньше часа, поскольку они тесно связаны с особенно мощными возмущениями в солнечном ветре – сильными ударными волнами и высокоскоростными потоками.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Новизна работы состоит в том, что в ней впервые установлена природа флуктуаций интенсивности космических лучей в окрестности крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Выполненный анализ измерений космических лучей в течение длительного интервала времени позволил впервые установить существование закономерных изменений (модуляции) спектра флуктуаций интенсивности космических лучей в цикле солнечной активности.

Практическая и научная значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов. Создание модернизированного спектрографа космических лучей позволяет производить непрерывную регистрацию потоков космических лучей 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 космических лучей с крупномасштабными возмущениями солнечного ветра позволяет сделать содержательные предсказания о динамике спектра флуктуаций интенсивности космических лучей. Применение методов спектрального анализа к данным регистрации на космических аппаратах интенсивности космических лучей и параметров солнечного ветра в режиме реального времени позволили создать и реализовать методику прогноза прихода на орбиту Земли межпланетных ударных волн.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений. 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.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, выводов и списка цитируемой литературы.

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

Вторая глава *“Современное состояние исследований флуктуаций интенсивности космических лучей”* приведен обзор современного состояния исследований флуктуаций интенсивности космических лучей, рассмотрены вопросы об их возможных источниках. Определенное место уделено результатам исследований динамики спектра флуктуаций интенсивности космических лучей 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 космических лучей в режиме реального времени может быть использована для краткосрочного прогноза прихода крупномасштабных возмущений солнечного ветра на орбиту Земли.

В третьей главе *“Методы исследования флуктуационных явлений”* посвящена методам исследования флуктуационных явлений в интенсивности

космических лучей 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 космических лучей и солнечном ветре возникают значительные затруднения, связанные с малостью длин используемых реализаций данных; с малостью амплитуд изучаемых сигналов, замаскированных большим уровнем шума в данных измерений; и с нестационарностью временных рядов. В этом случае обычные методы корреляционного анализа зачастую оказываются малоэффективными. Наиболее эффективными являются методы спектрального анализа, позволяющие не только оценить наличие выделенных амплитуд и частот сигналов в данных регистрации, но и их достоверность.

В четвертой главе *“Природа флуктуаций интенсивности космических лучей”* рассматриваются вопросы, связанные с установлением природы флуктуаций интенсивности космических лучей. В настоящее время по этому вопросу существуют две различные точки зрения. В одной развиваются представления о возникновении флуктуаций интенсивности космических лучей при рассеяниях потока заряженных частиц на альфвеновских волнах. Другая связана с тем, что флуктуации могут являться следствием модуляции интенсивности космических лучей быстрыми магнитозвуковыми волнами, генерированными в окрестности Земли низкоэнергичными космическими лучами с энергией до ~ 10 МэВ межпланетного или солнечного происхождения.

В пятой главе *“Флуктуации интенсивности космических лучей в цикле солнечной активности”* изучаются флуктуации интенсивности космических лучей 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 космических лучей, 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 космических лучей, можно ожидать, что их спектр мощности также должен испытывать соответствующую, коррелированную с циклом солнечной активности эволюцию.

Шестая глава *“Флуктуации межпланетного магнитного поля в 11-летнем цикле солнечной активности”* посвящена изучению флуктуаций межпланетного магнитного поля в 11-летнем солнечном цикле. 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. Так как весь наблюдаемый спектр межпланетного магнитного поля условно можно разбить на три участка (энергетический, инерционный и диссипативный), свойства флуктуаций в которых различны, то можно предположить, что и причины, приводящие к предполагаемой эволюции с солнечным циклом каждого из них, должны быть различными.

В седьмой главе “*Жесткостной спектр эффектов форбуша в цикле солнечной активности*” изучается поведение жесткостных спектров эффектов Форбуша с циклами солнечной активности. 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 станций мировой сети нейтронных мониторов с порогами геомагнитного обрезания от 0 до 13.45 ГВ. 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 в специально вырытой шахте. Спектрограф позволяет регистрировать частицы КЛ с энергиями от ~2 до 300 ГэВ.

И последняя, **восьмая глава** “*Прогноз космической погоды по измерениям флуктуаций интенсивности космических лучей в межпланетной среде*” 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>.

В заключении подведены итоги исследования, изложены его основные положения, сделаны выводы.

К основным результатам диссертационного исследования, обладающим научной новизной, относятся следующие положения и разработки соискателя:

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 ($EP \sim 0.01-10$ МэВ) частиц солнечного и межпланетного происхождения, которые имеют соответствующее распределение по частоте в 11-летнем солнечном цикле;
6. Показано, что наблюдаемые 11-летние изменения жесткостных 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.

Теоретической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых в области физики плазмы и солнечно-земной физики.

В методологическую основу исследования были положены разнообразные современные методы статистической обработки экспериментальных данных.

Оценивая достоинства диссертационной работы, следует, в первую очередь, отметить большой объем привлеченных для анализа данных, как теоретических, так и экспериментальных, и детальную проработку довольно сложных численных моделей. В работе получены интересные результаты и сделан важный шаг в создании модели и разработки методики прогнозирования методики радиационной обстановки на космическом аппарате.

В целом диссертация заслуживает высокой оценки. Однако, она не свободна от недостатков, к числу которых относятся следующие недостатки:

1. Соискателю следовало бы рассмотреть более шире вопросы, связанные с перспективами развития спектрографа КЛ дополненного новыми, современными детекторами — сцинтилляционными мюонными телескопами.

2. Диссертация значительно выиграла бы, если бы автор рассмотрел вопросы, связанные с прогнозом космической погоды по наземным измерениям интенсивности КЛ в режиме реального времени на основе международной базы данных нейтронных мониторов, представленных на сайте: <http://www.nmdb.eu>. Это тем более имеет смысл, что в последние несколько лет при непосредственном участии автора диссертации на основе именно этой базы данных получил развитие и реализован в режиме реального времени метод глобальной съемки, разработанный в ИКФИА СО РАН более 40 лет назад, о чем сообщалось на ряде международных и отечественных научных мероприятиях по КЛ.

Однако отмеченные недостатки не умаляют того основного достоинства диссертации, что соискателем проделана большая работа и получены новые теоретические результаты в активно развивающейся области науки. Они опубликованы в рецензируемых журналах и прошли серьезную апробацию на международных конференциях высокого уровня. Полученные Стародубцевым С.А. результаты представляют интерес для таких научных организаций России, как ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИОФАН, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, НИЯУ МИФИ, Институт прикладной физики РАН, ИЗМИРАН. По новизне, научной и практической значимости полученных результатов работа в полной мере отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по физико-математическим наукам.

Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме и хорошо оформлена. Стиль изложения в целом четкий и ясный. Диссертация имеет характер завершеного научного исследования и оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат и публикации соискателя в полной степени отражают ее наиболее существенные

положения, выводы и рекомендации и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Стародубцева С.А. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 30.01.2002 г. № 74 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 20.06.2011 г. № 475), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Стародубцев С.А., заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.03 - Физика Солнца.

Отзыв обсуждён и одобрен 20 марта 2014 на заседании семинара № 506 отдела космических лучей ИЗМИРАН.

Отзыв составили:

Зав. лабораторией вариаций космических лучей,
к.ф.-м.н.

А.В. Белов

Зав. лабораторией астрофизики,
д.ф.-м.н.

В.Н. Зиракашвили

Зав. отделом космических лучей,
к.ф.-м.н.

В.Г. Янке

Почтовый адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИЗМИРАН,
142190, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4
телефон: +7(495)8510925
e-mail: yanke@izmiran.ru

Подписи

А.В. Белова, В.Н. Зиракашвили и В.Г. Янке

заверяю

Ученый секретарь ИЗМИРАН, к.ф.-м.н.



А.И.Рез