

Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ  
(Երևանի Ֆիզիկայի Ինստիտուտ)

Հովհաննիսյան Արմեն Կոլյայի

ԵՐԿՐՈՐԴԱՅԻՆ ՏԻԵԶԵՐԱԿԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅՔԼԵՐԻ ՍՈՂՈՒՑԱՅԻՆՆ  
ԷՖԵԿՏՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՀՆԱՐԱՎՈՐ ՌԱԴԻԱՅԻՆՆ  
ՓՈԹՈՂԻՎՆԵՐԻ ՏԵՂԵԿԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՍԵՂՇՈՒՄԸ

Ա.04.16-Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական  
ճառագայթների ֆիզիկա՝ մասնագիտությամբ  
Ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի  
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՇԱԳԻՐ

ԵՂԵՎԱՆ 2012

---

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ им. А.И.Алиханяна  
(Ереванский Физический Институт)

Оганесян Армен Коляевич

ИЗУЧЕНИЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ВТОРИЧНЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ОПОВЕЩЕНИЯ О  
НАДВИГАЮЩИХСЯ РАДИАЦИОННЫХ БУРЯХ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.16 «Физика ядра,  
элементарных частиц и космических лучей»

ЕРЕВАН – 2012

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական լաբորատորիայի գիտական խորհրդում:  
Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր

Ա.Ա. Զիլինգարյան (ԱԳԼ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր

Ն. Զ. Ակոպով (ԱԳԼ)

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու

Ա. Հ. Տանեյան («Վեր» ՄՊԸ)

Առաջատար կազմակերպություն՝

Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2012 թ. մայիսի 15-ին Ժ. 14<sup>00</sup>-ին Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական լաբորատորիայում գործող ԲՈՀ-ի «Միջուկի և տարրական մասնիկների ֆիզիկա» 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Հասցեն՝ 0036, Երևան, Ալիխանյան եղբայրների 2:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական լաբորատորիայի գրադարանում:

Մեղմագիրն առաքված է 2012 թ. ապրիլի 15-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր՝

*Յ. Դազյան*

Է.Բ. Գազարյան

Тема диссертации утверждена ученым советом Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

А.А. Чилингарян (ННЛ)

Официальные опоненты:

доктор физ.-мат. наук

Н. З. Акопов (ННЛ)

кандидат физ.-мат. наук

А. Г. Тонян («ВЕБ» ООО)

Ведущая организация:

Ереванский Государственный Университет

Защита диссертации состоится 15 мая 2012 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета ВАК 024 "Физика ядра и элементарных частиц" Национальной научной лаборатории.

Адрес: Ереван, 0036, ул. Братьев Алиханян 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ННЛ.

Автореферат разослан 15 апреля 2012 г.

Ученый секретарь специализированного совета 024, д.ф.м.н.

Э.Д. Газазян

*Յ. Դազյան*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

“Космическая погода” - как термин появился в 90-х годах XX века, как описывающий наиболее важные аспекты науки о солнечно-земных связях. Раздел научных знаний, называемый “Солнечно-земные связи”, посвящен изучению совокупности всех возможных взаимодействий гелио- и геофизических явлений. Эта область исследования лежит на стыке физики Солнца, солнечной системы и геофизики и занимается изучением влияния солнечной изменчивости и солнечной активности через межпланетную среду на Землю, в частности на магнитосферу, ионосферу, атмосферу Земли. В практическом смысле к тематике космической погоды относятся, например, вопросы прогноза солнечной и геомагнитной активности, исследования воздействия солнечных факторов на технические системы (радиопомехи, радиационная обстановка и пр.), воздействия на биологические системы и людей.

Радиационная обстановка в космосе создаёт немало проблем не только космонавтам, но и конструкторам космических аппаратов. Ещё на заре космических полётов создатели спутников столкнулись с проблемой живучести солнечных батарей. Оказалось, что под действием интенсивных потоков частиц радиационных поясов они довольно быстро деградировали: их электрический ток, необходимый для питания бортовых систем, уменьшался. Пришлось их защищать от радиации – предохранять слой кремния стеклом, поглощающим большую долю радиации. Так начиналась эра “борьбы” с космической радиацией.

Радиационная буря это резкое увеличение потока заряженных частиц и  $\gamma$ -квантов в околоземном пространстве. Во время солнечных вспышек в пространство могут быть выброшены заряженные частицы (в основном протоны) энергии от нескольких МэВ до десятков ГэВ. Эти частицы дойдя до Земли, могут нанести серьезный вред как орбитальным станциям, так и наземным технологиям, так как если для примера через транзистор пройдет заряженная частица, она может индуцировать дополнительные токи, в следствии чего может поменяться программа ответственная за ориентацию спутника. В случае когда заряженные частицы от Солнца доходят до Земли и имеют достаточную энергию для преодоления магнитного поля Земли, они создают в атмосфере каскады множественных вторичных частиц, которые доходят до поверхности (такое событие называется Наземное Превышение – Ground Level Enhancement - GLE) и могут индуцировать дополнительные токи в протяженных высоковольтных электрических кабелях, что может вывести из строя трансформаторы на электрических подстанциях. Наиболее известной стала авария, вызванная магнитной бурей 13 марта 1989 г., в ходе которой 6 миллионов человек и большая часть промышленности канадской провинции Квебек на 9 часов остались без электричества.

Приведенные примеры показывают насколько важно иметь хорошую систему оповещения о надвигающихся радиационных бурях. В настоящее время точные математические модели, описывающие процессы солнечно-земной физики,

отсутствуют. Поэтому в основу прогнозов положены феноменологические, вероятностные модели, то есть модели, описывающие последовательность физических явлений, каждый шаг которой может выполняться с некоторой вероятностью. Существующие системы оповещения делятся на спутниковые и наземные. Центр Прогнозирования Космической Погоды (SWPC – Space Weather Prediction Center) предоставляют услуги прогнозирования используя данные о потоках электронов, протонов и  $\gamma$ -квантов от спутников GOES, ACE, и т.д. Однако время прогнозирования можно улучшить если использовать данные наземных детекторов частиц, так как солнечные частицы самых высоких энергий, которые не регистрируются спутниками ввиду малой интенсивности, создают каскады частиц в атмосфере которые могут быть зарегистрированы наземными установками.

**Цель работы** – провести анализ модуляционных эффектов, влияющих на интенсивности регистрируемых потоков элементарных частиц и создать систему оповещения о надвигающейся радиационной буре на основе данных Арагацкого Центра Космической Погоды (ASEC), в том числе:

- Исследование модуляционных эффектов (солнечного и атмосферного происхождения) вторичных космических лучей для создания системы оповещения о радиационных бурях.
- Применение медианных алгоритмов фильтрации временных рядов детекторов ASEC.
- Исследование повышения потока частиц во время грозовых явлений детекторами ASEC.
- Исследование характеристик созданного алгоритма оповещения о надвигающейся радиационной буре (эффективность и вероятность ложной тревоги).

#### **Практическая значимость полученных результатов.**

В рамках работы создана система оповещения о возможных радиационных бурях. Оповещения посылаются в виде сообщений электронной почтой заинтересованным организациям и физическим лицам. Созданы шаблоны оповещений с объяснениями разработанных стандартов и типов тревожных сигналов. Система оповещения будет интегрирована в европейский проект COST ES0803.

Были внедрены алгоритмы фильтрации временных рядов интенсивности космических частиц, измеряемых наземными детекторами. Созданная программа в настоящее время используется для коррекции данных Арагацкого и Нор-Амбердского нейтронных мониторов направляемых в базу данных Евразийского Консорциума Нейтронных Мониторов (NMDB – Neutron Monitor Database) для всеобщего доступа.

Предложена методика регистрации Широких Атмосферных Ливней (ШАЛ) с помощью нейтронных мониторов и коэффициента мультипликации нейтронов (отношение числа вторичных нейтронов попавших в счетчик нейтронного монитора к числу первичных).

Статистический анализ превышений в данных наземных детекторов ASEC может быть использован для детального изучения процессов изменения спектров и лавинного увеличения числа вторичных частиц в атмосферных электрических полях.

#### **Научная новизна.**

- Создана система оповещения о надвигающихся радиационных бурях, основанная на спутниковых данных о рентгеновских вспышках и статистически значимых превышениях потоков космического излучения, регистрируемого наземными детекторами частиц.
- Создана программа для автоматической фильтрации временных рядов в реальном времени, обеспечивающая однородность функционирования измерительных каналов детекторов частиц во время многолетних исследованиях.
- Впервые проведен статистический анализ увеличений потоков вторичных частиц во время грозой активности.
- Проведено измерение среднего коэффициента мультипликации нейтронного монитора при регистрации событий разного типа.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

- Программа оповещения о надвигающихся радиационных бурях: расчеты эффективности и вероятности ложных тревог созданной системы.
- Алгоритмы фильтрации временных рядов.
- Результаты статистического анализа превышений скорости счета детекторов ASEC во время грозовой активности.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на: международном симпозиуме “Первые результаты международного гелиофизического года 2007” (Созополь, Болгария, 2008), международном симпозиуме “FORGES-2008” (Нор Амберд, Армения, 2010), на региональной встрече по космической погоде (IHU-ISWI Regional Meeting, Шибеник, Хорватия, 2009), на международной конференции “TEPA-2010” (Нор Амберд, Армения, 2010), на международной конференции “Aragats-2011” (Нор Амберд, Армения, 2011).

**Публикации.** Основной материал диссертации опубликован 5 работах- 3 статьях и 2 тезисах докладов (см. список в конце автореферата).

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Диссертационная работа изложена на 110 стр. и содержит 14 таблиц, 82 рисунка и 56 наименований библиографических ссылок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава состоит из 3-х разделов. В первом разделе дается определение и описание понятий “Космическая погода” и “Радиационная буря”. Цель исследования космической погоды - прогнозирование возможных воздействий на технологии путем наблюдения, мониторинга, анализа и моделирования. Наиболее значимое влияние на космическую погоду в около-земной среде оказывает Солнце. Солнце влияет на околоземную среду выбрасывая электромагнитное излучение, плазму, высокоэнергичные частицы и ионы. Эти частицы дойдя до орбитальных спутников в околоземном пространстве могут создать дополнительные токи в электронике спутников, что может привести как к изменению программного обеспечения, так и к выходу из строя элементов электроники. В настоящее время точные математические модели, описывающие процессы солнечно-земных связей, отсутствуют. Поэтому в основу прогнозов положены феноменологические, вероятностные модели.

Второй раздел описывает существующие методы изучения космической погоды – спутниковые и наземные. Спутники и космические корабли космических агентств США, Европы, Японии и России оснащаются детекторами частиц для регистрации космических лучей. Эти спутники круглосуточно измеряют потоки рентгеновского излучения, гамма-квантов, протонов, электронов, а так же магнитное поле и посылают эти данные на Землю. Однако с возрастанием энергии космических лучей их интенсивность резко падает и вероятность их регистрации уменьшается (ввиду малых размеров детекторов космического базирования), и для измерения высокоэнергичной компоненты космического излучения используются наземные детекторы. Последние регистрируют вторичные потоки частиц, рожденные в результате взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атмосферы. Вторичные потоки частиц модулируются как от активности солнца, так и от атмосферных явлений. В работе изучены возможные модуляционные эффекты для создания системы оповещения радиационных бурях с наименьшей вероятностью ошибки.

Таблица 1 Шкала Радиационных Бурь по NOAA

Категория		Поток ионов энергии выше 10 МэВ	Средняя частота
Шкала	Описание		
S5	Экстремальный	$10^5$	Меньше чем 1 за цикл
S4	Суровый	$10^4$	3 за цикл
S3	Сильный	$10^3$	10 за цикл
S2	Умеренный	$10^2$	25 за цикл
S1	Легкий	10	50 за цикл

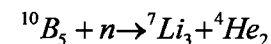
Третий раздел описывает существующие методы прогнозирования Космической Погоды. Центр Прогнозирования Космической Погоды (SWPC – Space Weather Prediction Center) NOAA в реальном времени предоставляет данные от десятков

спутников и космических станций (GOES , ACE, и.т.д) в интернет, а также предоставляет услуги оповещения в случае изменения различных компонент космической погоды во время солнечных вспышек, в том числе и радиационных бурь, см Таблицу 1.

Однако спутниковые детекторы регистрируют в основном мало энергичную компоненту Солнечных заряженных частиц, и дают сигнал оповещения позже чем это могут делать системы прогнозирования, основанные на данных наземных детекторов, так как с помощью последних имеется возможность регистрировать частицы высокие энергий. Конечной целью диссертации является создание системы прогнозирования радиационных бурь используя данные детекторов ASEC. Для этого были исследованы модуляционные эффекты вторичных космических лучей для понимания статистического характера временных рядов регистрируемых детекторами ASEC и для выбора параметров алгоритма системы оповещения так, чтобы иметь максимальную эффективность и наименьшую вероятность ложных тревог.

Вторая глава диссертации состоит из двух разделов. В первом разделе описаны нейтронные мониторы ASEC, которые находятся на высотах 3200 м и 2000 м на горе Арагац. Несмотря на 50 лет истории использования этих детекторов, наземные нейтронные мониторы (NM64) (Рисунок 1) остаются достаточно надежной аппаратурой для измерения космических лучей, и они играют ключевую роль в качестве инструмента исследования в области космической физики, солнечно-земных связей и исследования космической погоды. Они чувствительны к потокам частиц, проникающим в атмосферу Земли с энергией около 0.5-15 ГэВ, т.е. в диапазоне энергий, которые не могут быть измерены детекторами в космосе таким же простым, недорогим, и статистически точным методом.

Нейтронный монитор состоит из газонаполненных пропорциональных счетчиков окруженных замедлителями, свинцового размножителя и отражателя. Регистрируемые адроны (протоны и нейтроны) вторичных потоков космических лучей вызывают ядерные реакции в свинце и рождение множества нейтронов низких энергий. Эти нейтроны с энергиями порядка МэВ замедляются до тепловой энергии и регистрируются пропорциональными счетчиками. Пропорциональный счетчик в нейтронном мониторе регистрирует тепловые нейтроны, кинетическая энергия которых около 0,025 эВ. Счетчик заполнен газом - трифторидом бора (BF<sub>3</sub>), обогащенным до 96% изотопом <sup>10</sup>B при давлении в 0,27 бара. Регистрация тепловых нейтронов в счетной трубке происходит при их взаимодействии с ядром <sup>10</sup>B в экзотермической реакции:



В целях повышения вероятности ядерной реакции нейтроны, как уже упоминалось выше, должны быть замедлены. Функция замедлителя заключается в уменьшении энергии нейтронов как можно ближе к тепловой энергии (~1/40 эВ). Это осуществляется путем столкновения нейтронов с другими ядрами. Обмен кинетической энергией происходит лучше, чем ближе массы ядра к массе самого нейтрона. Материалы с низкой атомной массой, которые, как правило, содержат водород, например, полиэтилен, используются в NM64 в качестве замедлителя.

Замедлитель окружен свинцовым умножителем. Свинец выполняет две функции в нейтронном мониторе:

1. Нейтроны низких энергий образуются в ядерных реакциях адронов со свинцом.
2. Среднее число вылетевших нейтронов на каждый падающий нуклон, ~ 15, и таким образом свинец приводит к увеличению общей вероятности регистрации.

Свинец имеет сравнительно малое сечение поглощения для тепловых нейтронов. Отражатель также экранирует и поглощает нейтроны низкой энергии, которые производятся в окружающем веществе за пределами нейтронного монитора.

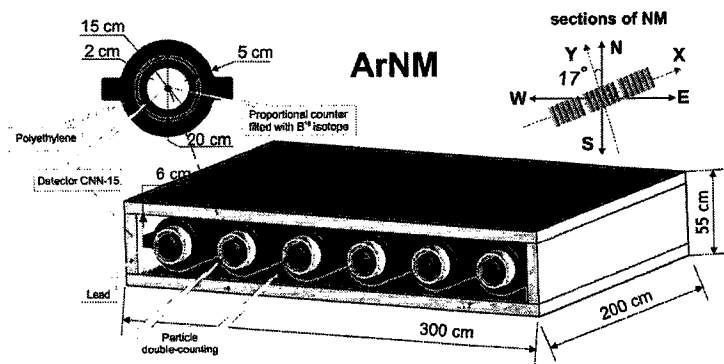


Рисунок 1 Арагацкий Нейтронный Монитор

Детекторы ASEC работают круглосуточно, ежеминутно измеряя потоки вторичных частиц, и регистрируя модуляционные эффекты этих потоков из-за солнечной активности. Основные модуляционные эффекты космических лучей можно разбить на 3 типа: Форбушовские понижения, геомагнитные бури и наземные превышения. Кроме Солнечных модуляционных эффектов вторичные космические лучи так же модулируются от воздействия атмосферы. Изменения давления, температуры, электрического и магнитного поля влияет на потоки вторичных космических лучей. В Таблице 2 приведены корреляции суммированных временных рядов нейтронных мониторов ASEC. Сравниваются корреляции первичных данных Арагацкого и Нор-Амбердского нейтронных мониторов с данными поправленными на давление и на дневную волну и с моделированными по гауссовскому распределению временными рядами.

Как видно из таблицы после серии поправок средняя корреляция приближается к полученной по моделированным независимым случайным временным рядам, а данные без поправок не являются идеально независимыми, что должно быть учтено при создании системы оповещения радиационных бурь.

Таблица 2 Корреляции временных рядов нейтронных мониторов ASEC при разных поправках

	Моделированные данные	Начальные данные	Данные поправленные на давление	Данные поправленные на давление с вычетом дневной волны
Среднее значение корреляций	0.001±0.009	0.13115±0.197 722	0.0344982±0.0718 742	0.027816±0.0685 729

Во втором разделе описаны алгоритмы фильтрации временных рядов, разработанные для корректировки данных многоканальных детекторов космических лучей. Наземные детекторы вторичных космических лучей ASEC круглосуточно регистрируют заряженные и нейтральные потоки частиц. Детекторы ASEC расположены на двух высокогорных станциях, на которых часто бывают суровые погодные условия, которые могут привести к скачкам в напряжении и к выходу из строя электроники детекторов. Из-за этого мы можем иметь кратковременные и долговременные ошибки во временных рядах наших детекторов. Поэтому необходимо было разработать алгоритмы фильтрации временных рядов, которые смогли бы найти дефектные данные, восстановить пропущенные участки, при этом не влияя на зарегистрированные сигналы (модуляционные эффекты).

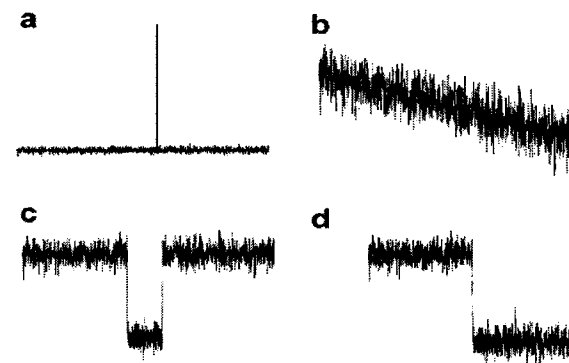


Рисунок 2 Типы ошибочных данных во временных рядах.

На Рисунке 2 изображены 4 основных вида ошибок которые встречаются во временных рядах детекторов. Разработаны и протестированы 2 алгоритма для корректировки этих видов ошибок. Первый алгоритм это Медианный Фильтр, который позволяет исправить кратковременные (несколько минут) ошибки, а второй алгоритм (Относительный Медианный Фильтр) позволяет скорректировать и

восстановить долговременные промежутки испорченных данных используя данные неиспорченных каналов того же детектора.

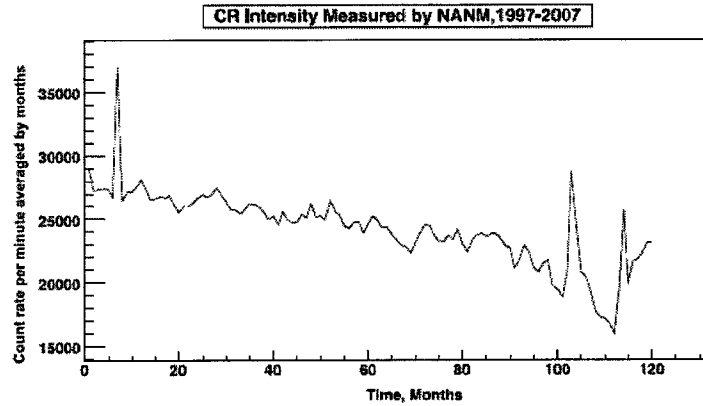


Рисунок 3 Данные Нор-Амбердского Нейтронного Монитора за 23-ий Солнечный Цикл

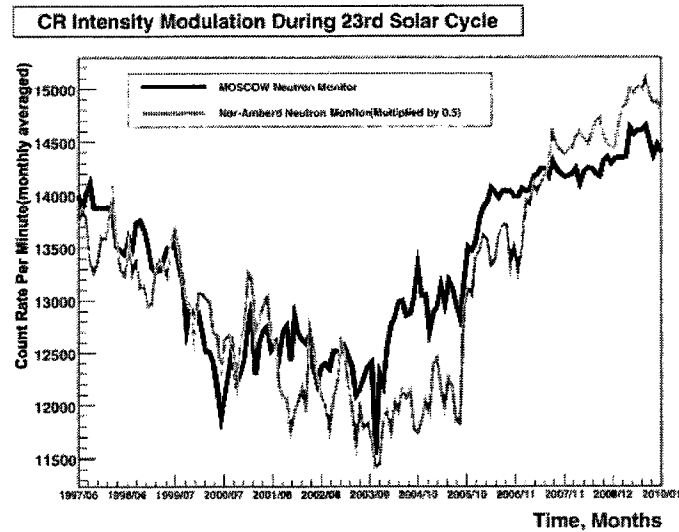


Рисунок 4 Скорректированные данные Нор-Амбердского нейтронного монитора в сравнении с данными Московского нейтронного монитора за 23-ий цикл.

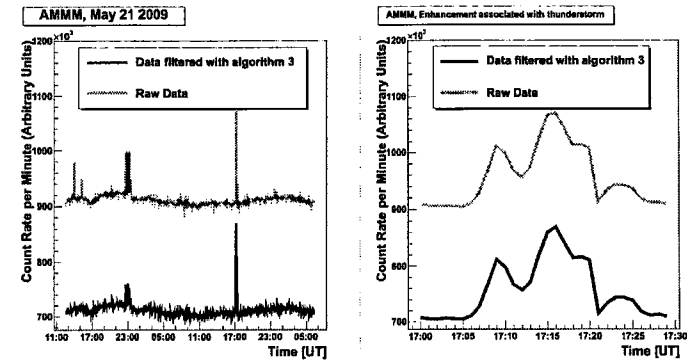


Рисунок 5 Влияние программы фильтрации на модуляционные эффекты атмосферы (превышения скорости счета во время гроз)

На Рисунке 3 изображены данные Нор-Амбердского Нейтронного Монитора за 23-ий Солнечный Цикл (12 лет). На Рисунке 4 изображены те же данные после фильтрации в сравнении с данными Московского нейтронного монитора, на котором уже видно, что модуляционный эффект солнечного цикла (уменьшение интенсивности в середине цикла и возрастание в конце), зарегистрированный Нор-Амбердским нейтронным монитором, сравним с Московским нейтронным монитором.

Как видно из показанных рисунков, программа фильтрации довольно хорошо корректирует ошибочные данные детекторов показанные на Рисунке 2.

Разработанная программа сейчас работает в режиме реального времени для обоих нейтронных мониторов ASEC. Однако, также важно чтобы реальные физические сигналы не изменялись из-за программы фильтрации. Можно использовать разные параметры алгоритмов для получения разного уровня фильтрования. В диссертации подробно описаны свойства программы при разных параметрах алгоритмов и используя эти результаты пользователь может сам выбрать для себя уровень фильтрации. Если использовать только второй алгоритм фильтрации - это всегда сохранит модуляционные эффекты, однако не уберет кратковременные пики от наводок, если наводки действуют на все счетчики данного детектора. На Рисунке 5 показано как влияет программа фильтрации (нижние кривые, правый рисунок показывает в укрупненном временном масштабе правый пик на левом рисунке) на физические сигналы, зарегистрированные детекторами. В данном случае параметры выбраны так, чтобы максимально не подавились физические сигналы и как видно из рисунка (пик справа - поток  $\gamma$ -квантов от грозового облака) остался неотфильтрованным, однако во временном ряде остался также пик от наводок (внизу слева).

Третья глава диссертации состоит из двух разделов. В первом разделе приведены результаты статистического анализа превышений в данных детекторов ASEC связанных с грозовой активностью. С 2007 года до сегодняшнего дня детекторы ASEC зарегистрировали более 200 событий связанных с грозовой

активностью. Возможность ускорения электронов в атмосферных электрических полях была впервые рассмотрена английским физиком Вильсоном в 1924 году. Однако, в те годы поиски грозových частиц не увенчались успехом из-за ограниченных возможностей экспериментальных установок. Несмотря на давнюю историю, механизмы ускорения частиц в электростатических полях грозových облаков еще до конца не ясны. В 1992 году А.Гуревич и его коллеги создали теорию ускорения электронов в грозových электрических полях. Такие электроны назвали "лавинами релятивистских убегающих электронов (RREA-Relativistic Runaway Electron Avalanche)". Минимум ионизационных потерь электронов в воздухе наблюдается при энергиях 100 КэВ ÷ 3-4 МэВ. При достаточно больших полях электроны будут получать больше энергии, чем теряют на ионизацию, то есть будут ускоряться. Однако, кроме поля необходимы еще и электроны с начальными энергиями около 1 МэВ. Такие электроны присутствуют в составе вторичных космических лучей.

События зарегистрированные в детекторах ASEC можно разделять на 3 типа:

- События с одним пиком,
- События с несколькими пиками и длительностью не более 30 минут,
- Событие с множественными пиками и длительностью (более 35 минут).

Следующие аргументы доказывают что зарегистрированные превышения не являются наводками или сбоями электроники от гроз:

- Помехи имеют характерную форму и связаны с грозowymi разрядами, длящимися миллисекунды, а детекторы ASEC регистрируют непрерывные превышения в 10 и более минут.
- Детекторы AMMM и МАКЕТ имеющие разную электронику и расположенные на расстоянии 400м друг от друга регистрируют одинаковые пики.
- Только частицы с малым энерговыделением в детекторе ASNT показывают превышения во время грозовой активности.

Статистический анализ событий RREA показал следующие результаты:

- После рассмотрения возможных источников помех было показано существование потоков частиц от грозových облаков.
- Было показано существование нейтронов в потоке RREA частиц. Происхождение нейтронов можно объяснить фотоядерными реакциями гамма-квантов тормозного излучения с ядрами атмосферы.
- Было показано, что ливни RREA простираются как минимум на 400м и более, так как AMMM и МАКЕТ в большинстве случаев регистрировали превышения одинаковой амплитуды.

Во втором разделе приведены результаты исследования изменений коэффициента средней множественности при регистрации Широких Атмосферных Ливней (ШАЛ). Коэффициент множественности нейтронов это число, которое показывает отношение числа вторичных нейтронов рожденных в свинце нейтронного детектора к числу первичных атмосферных нейтронов, попавших на детектор. Электроника нейтронных мониторов ASEC позволяет регистрировать нейтроны с различными мертвыми временами (0.4мкс, 250мкс, 1250мкс). Когда мертвое время равно 1250мкс, тогда для каждого первичного нейтрона регистрируется один сигнал, а для 0.4мкс регистрируются все вторичные нейтроны. Таким образом отношение скорости счета для 0.4мкс на скорость счета 1250мкс и есть коэффициент множественности. Исследование временных рядов нейтронных мониторов привели к обнаружению событий, во время которых были превышения только во временном ряде соответствующему 0.4мкс мертвого времени (Рисунок 6).

Эти одноминутные пики можно объяснить регистрацией ШАЛ. Во время такого события тепловые нейтроны, образованные множественными нейтронами и протонами ШАЛ могут попасть в монитор за время меньше чем 0.4мкс и не регистрироваться при мертвых временах 250мкс и 1250мкс. Это указывает возможность регистрации и исследования ШАЛ с помощью нейтронных мониторов.

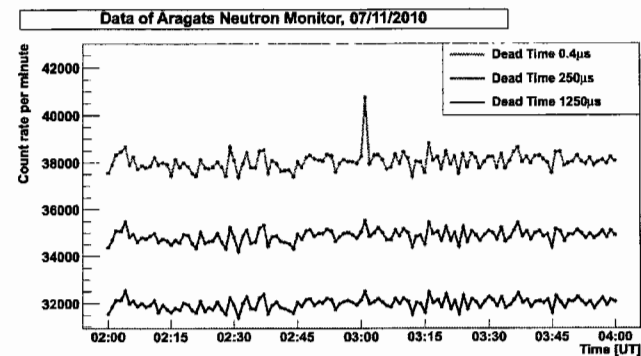


Рисунок 6 Данные Арагацкого Нейтронного Монитора: в ~3 часа UT ШАЛ падает на монитор.

В среднем 4 раза за сутки регистрируются пиковые превышения множественности больше  $4\sigma$  во временном ряде коэффициентов средней множественности нейтронов. Было показано что эта интенсивность соответствует интенсивности ШАЛ с энергией выше  $4 \times 10^{15}$ Эв.

В четвертой главе описана система оповещения наземных превышений, созданная в рамках диссертации. Система оповещения ищет наземные превышения от высокоэнергичных частиц, которые образовались во время солнечных вспышек, и в атмосфере земли создали дополнительные каскады вторичных частиц. Во время 23-го Солнечного Цикла произошло 11 наземных превышений, из которых детекторы ASEC

зарегистрировали только 3, так как величина геомагнитного обрезания для нашей станции довольно высока (7.1 ГВ).

Алгоритм поиска наземных превышений выглядит следующим образом:

1. В режиме реального времени сканируются данные спутника GOES на наличии рентгеновской вспышки на Солнце больше мощности M4 (для нашей станции более слабые вспышки не дают наземных превышений).
2. После обнаружения вспышки включается программа поиска пика в детекторах ASEC. Считается, что найдено превышение, если интенсивность N последовательных точек временного ряда выше порогового значения T.
3. В случае обнаружения превышения сразу во всех детекторах, которые участвуют в системе оповещения, посылается сообщение с помощью электронной почты (ниже приведен пример сообщения электронной почты в случае обнаружения GLE).

**GLE Alert**

**Notification Date: 2012-01-27 07:58:07**

**GLE Alert System of Cosmic Ray Division  
X-Ray Flare M4.3 detected on 2012-01-27 19:29:00  
GLE Detection:**

**Detector: arnm  
GLE Alert detected at 2012-01-27 19:55:00  
35 minutes after flare:  
Mean Count Rate: 38307  
Root Mean Square: 304  
Maximal Deviation: 2.6 sigma  
Pre-alert points: 3**

Так же можно следить за процессом поиска GLE на сайте <http://crd.verphi.am/alert/index.php>.

Главными параметрами качества алгоритма являются эффективность и вероятность ложной тревоги. После подробного изучения наземных превышений зарегистрированных детекторами ASEC во время 23-го цикла солнечной активности были выбраны параметры поиска для получения максимальной эффективности.

Предполагая, что временные ряды интенсивностей частиц независимы, имеют гауссовское распределение, получаем, что вероятность встретить N последовательных интенсивностей выше порога T будет  $P^N$ , где P – это вероятность получения интенсивности выше T.

Для проверки этой гипотезы мы взяли временные ряды из 100,000 минут и сосчитали число превышений для разных параметров алгоритма. Эти результаты

показаны в Таблице 3. Как видно реальные числа превышений намного больше чем ожидалось в случае отсутствия автокорреляций. Это объясняется тем, что скорости счета в данную минуту и в следующую не являются величинами независимыми, так как на потоки вторичных лучей влияет состояние атмосферы – давление, температура, электрические и магнитные поля. В таблице видно что после коррекции на атмосферное давление можно уменьшить число ложных тревог. Используя характеристики наземных превышений зарегистрированных детекторами ASEC мы пришли к выводу, что параметры  $N=3$  и  $T=1\sigma$  дают наибольшую эффективность, одновременно обеспечивая минимум ложных тревог. Для этих параметров вероятность ошибки можно сосчитать из данных Таблицы 3. Как видно из последней, для Арагацкого (ArNM) и Нор-Амбердского (NaNM) нейтронных мониторов за 100,000 минут было в среднем 500 ложных тревог, откуда вероятность ошибки получается равной 0,005. Если использовать 2 детектора (2 нейтронных монитора в нашем случае), то вероятность будет  $0,005^2=0,000025$ . Однако это так, если опять предположить, что ряды двух детекторов статистически независимы. После сканирования данных обоих нейтронных мониторов в течение 2011 года программа нашла примерно 100 ошибочных превышений, хотя при теоретическом расчете ложных тревог должно было быть 13. Это опять показывает что нельзя считать данные разных детекторов статистически независимыми. Эмпирическая вероятность ложной тревоги с двумя детекторами равна 0,0002.

**Таблица 3** Расчет вероятности ложных тревог

Число точек до оповещения	Порог [σ]	Число ожидаемых ложных тревог	NANM первичные данные /данные с поправкой на давление	ArNM первичные данные /данные с поправкой на давление
3	1	399	752/513	687/474
3	1.5	29	130/72	116/67
3	2	1	19/11	14/9

Так как мы сканируем временной ряд только 2 часа после рентгеновской вспышки на Солнце, а вспышки выше M4 бывают в среднем 10 раз в году максимума солнечной активности, то частота ошибки будет  $0,0002 \cdot 1200 = 0,24$  в году, то есть 1 ошибка за 4 года. Если использовать систему оповещения с тремя детекторами, то ошибка уже будет незначительна.

В заключение приведем основные результаты работы:

- Реализованы алгоритмы фильтрации данных многоканальных детекторов в режиме реального времени [3].
- Проведен статистический анализ превышений, связанных с процессами RREA. Приведены доказательства регистрации процессов грозových превышений [2,4].
- Показана возможность использования коэффициента множественности нейтронного монитора для анализа регистрации ШАЛ и нейтронов в процессе грозových превышений [1].
- Разработана система оповещения о надвигающейся радиационной буре [5].

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Hovhannisyan A., Calculation of Mean Multiplicity Coefficients for ASEC Neutron Monitors, Proceedings of International Symposium FORGES, Nor-Amberd, Armenia, pp. 127-131, 2008.
2. A. Chilingarian, A. Daryan, A. Hovhannisyan, Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons, Physical Review D 82, 043009, 2010.
3. A. Hovhannisyan, A. Chilingarian, Median Filtering algorithms for multichannel detectors, *Advances in Space Research, Volume 47, Issue 9, Pages 1544-1557*, 2011.
4. A. Chilingarian, G. Hovsepyan, and A. Hovhannisyan; *Particle bursts from thunderclouds: Natural particle accelerators above our heads*, Physical review d 83, 062001, 2011.
5. Hovhannisyan A., Development of GLE alert algorithm based on ASEC particle detectors, Proceedings of Second International Cosmic Ray Workshop "Aragats 2011", Nor-Amberd, Armenia, pp. 165-169, 2012.

## Ամփոփագիր

Ատենախոսությունը նվիրված է երկրորդական տիեզերական ճառագայթների հոսքերի մոդուլյացիոն էֆեկտների ուսումնասիրությանը և Արագած Գիտահետազոտական Կայանի (ASEC) դետեկտորների սովյալներով ռադիացիոն փոթորիկների տեղեկացման համակարգ ստեղծելուն: Տիեզերական ճառագայթները տարրական լիցքավորված և չլիցքավորված մասնիկներ են, որոնք առաջանում են տիեզերքում: Նրանք կարող են առաջացնել երկրորդական մասնիկներ, երբ թափանցում են Երկրի մթնոլորտ: *Ճառագայթ* տերմինը պատմական է, քանզի ի սկզբանե ենթադրվում էր, որ տիեզերական ճառագայթները իրենցից ներկայացնում են էլեկտրամագնիսական ճառագայթում: Առաջնային տիեզերական ճառագայթները (տիեզերքից Երկրի մթնոլորտ ստեղծող) կազմված են կայուն միջուկներից՝ պրոտոնից մինչև երկաթ, ինչպես նաև էլեկտրոններից:

Տիեզերական ճառագայթները հայտնագործվել են 1912թ.-ին Վիկտոր Հեսսի կողմից այն ժամանակ, երբ նա հայտնաբերեց, որ օդապարհկով բարձրացրած էլեկտրոսկոպը ավելի արագ է լիցքաթափվում, քան Երկրի մակերևույթի վրա գտնվողը: Տիեզերական ճառագայթները ազդեցության են ենթարկվում ինչպես միջատոդային մագնիսական դաշտերի կողմից, այնպես էլ միջուկորակային մագնիսական դաշտի կողմից, որը պարունակվում է արևային քամու մեջ: Գալակտիկ տիեզերական ճառագայթները և Արեգակը Տիեզերական Եղանակի հիմնական բաղադրամասերն են: Ռադիացիոն փոթորիկը դա բարձր էներգիայի մասնիկների հոսքն է, որն առաջանում է արեգակի վրա բռնկումների հետևանքով: Այդ մասնիկները հասնելով Երկիր մեծ վնաս են հասցնում երկրային և արբանյակային տեխնոլոգիաներին: Այդ իսկ պատճառով կարևոր է ունենալ լավ կանխագուշակման համակարգ, որը կտեղեկացնի հնարավոր ռադիացիոն փոթորիկների մասին: Ատենախոսության առաջին գլուխը առավել մանրամասնորեն է նկարագրում ինտրի դրվածքը, այն է՝ Տիեզերական Եղանակի սահմանումը, հետազոտման ժամանակակից մեթոդները և գոյություն ունեցող կանխագուշակման հնարավորությունները:

Արեգակը նույնպես հանդիսանում է տիեզերական ճառագայթների՝ միջուկների և էլեկտրոնների աղբյուր, որոնք արագանում են բռնկումների ժամանակ: Այդպիսի դեպքերի ժամանակ էներգետիկ մասնիկների ինտենսիվությունը ժամերի և օրերի ընթացքում միջուկորակային տարածությունում աճում է  $10^2-10^6$  անգամ: Այդպիսի երևույթներ ավելի հաճախակի են լինում արևային ցիկլի ակտիվ փուլում: Արեգակի մոդուլյացիոն էֆեկտները լինում են 3 տեսակի՝ Ֆոբրուշյան Նվազումներ, Գեոմագնիսական Փոթորիկներ և Վերգետնյա Ավելացումներ: Ատենախոսության 2-րդ գլուխը Արեգակնային մոդուլյացիոն էֆեկտների, Արագած գիտահետազոտական

կայանի դետեկտորների, ինչպես նաև բազմաչափանի դետեկտորների ժամանակային շարքերի ֆիլտրացիայի ալգորիթմների կիրառման մասին է:

Երկրորդական տիեզերական ճառագայթների հոսքը մոդուլացվում է ինչպես Արեգակի ազդեցությամբ, այնպես էլ Երկրի մթնոլորտային պայմանների փոփոխությամբ: Երբ մասնիկը մտնում է մթնոլորտ, այն անցնում է ազոտի և թթվածնի միջուկների մոտով և վաղ թե ուշ այն բախվում է նրանցից մեկի հետ՝ առաջացնելով նոր մասնիկներ: Այդպես զարգանում է երկրորդային մասնիկների հեղեղը մթնոլորտում: Մթնոլորտային պայմանների փոփոխությունները (ճնշում, ջերմաստիճան) կարող են հանգեցնել երկրորդական մասնիկների հոսքի փոփոխության: Բացի դրանից, մթնոլորտի վերին շերտերում ամպրոպների ժամանակ առաջացող էլեկտրական դաշտը կարող է փոխել երկրորդական տիեզերական ճառագայթների քանակը և էներգիական սպեկտրը: Ատենախոսության 3-րորդ գլխում բերվում է ամպրոպների ժամանակ ASEC դետեկտորներում մասնիկների աճերի ստատիստիկական անալիզի արդյունքները: Ցույց է տրվում նեյտրոնների գրանցման հավաստիությունը ամպրոպային հեղեղների ժամանակ: Ներկայացվում է նաև Նեյտրոնային Մոնիտորի բազմակիության գործակիցը և ցույց է տրվում, թե ինչպես կարելի է օգտագործել այն Լայն Մթնոլորտային շեղեղների ուսումնասիրության ժամանակ:

Արեգակնային և մթնոլորտային մոդուլյացիոն էֆեկտները ուսումնասիրելուց հետո ստեղծվել է ռադիացիոն փոթորիկների տեղեկացման համակարգ Արագած Գիտահետազոտական Կայանի համար: Ատենախոսության 4-րորդ գլխում նկարագրված է վերջինիս աշխատանքի ալգորիթմը, հաշվված են համակարգի էֆեկտիվությունը և սխալի հավանականությունը:

### Abstract

The aim of the dissertation is to examine the modulation effects that occur with secondary cosmic ray fluxes and the development of automatic alert system for ASEC particle detectors in case of high energy radiation. Cosmic rays are energetic charged subatomic particles, originating in outer space. They may produce secondary particles that penetrate the Earth's atmosphere and surface. The term ray is historical, as cosmic rays were thought to be electromagnetic radiation. Primary cosmic rays (those that enter the atmosphere from deep space) are composed of familiar stable subatomic particles that normally occur on Earth, such as protons, atomic nuclei, or electrons. However, very small fraction of the flux consists of stable particles of antimatter, such as positrons or antiprotons, and the precise nature of this remaining fraction is an area of active researches.

Cosmic rays were discovered in 1912 by Victor Hess, when he found that an electroscopes discharged more rapidly as he ascended in a balloon. He attributed this to a source of radiation entering the atmosphere from above, and in 1936 was awarded the Nobel Prize for his discovery. For some time it was believed that the radiation was electromagnetic in nature (hence the name cosmic "rays"), and some textbooks still incorrectly include cosmic rays as part of the electromagnetic spectrum. However, during the 1930's it was found that cosmic rays must be electrically charged, because they are affected by the Earth's magnetic field.

From the 1930s to the 1950s, before man-made particle accelerators reached very high energies, cosmic rays served as a source of particles for high energy physics investigations, and led to the discovery of subatomic particles that included the positron and muon. Although these applications continue, since the dawn of the space age the main focus of cosmic ray research has been directed towards astrophysical investigations of where cosmic rays originate, how they get accelerated to such high velocities, what role they play in the dynamics of the Galaxy, and what their composition tells us about matter from outside the solar system. To measure cosmic rays directly, before they have been slowed down and broken up by the atmosphere, research is carried out by instruments carried on spacecraft and high altitude balloons, using particle detectors similar to those, used in nuclear and high energy physics experiments.

Just as cosmic rays are deflected by the magnetic fields in interstellar space, they are also affected by the interplanetary magnetic field embedded in the solar wind (the plasma of ions and electrons blowing from the solar corona at about 400 km/sec), and therefore have difficulty reaching the inner solar system. Spacecraft venturing out towards the boundary of the solar system they have found that the intensity of galactic cosmic rays increases with distance from the Sun. As solar activity varies over the 11 year solar cycle the intensity of cosmic rays at Earth also varies, in anti-correlation with the sunspot number. Cosmic rays and the Sun with its magnetic field and solar wind are main components of the Space Weather. Today in century of space flights and space investigation, also the developing space technologies (GPS satellites, etc...) it is of utmost importance to now cast and forecast the conditions in near Earth environments. Chapter 1 of this thesis is covering in more details the definition of Space Weather, the importance of its investigation and forecasting, also the satellite and ground based methods of its investigation.

The Sun is also a sporadic source of cosmic ray nuclei and electrons that are accelerated by shock waves traveling through the corona, and by magnetic energy released in solar flares. During such occurrences the intensity of energetic particles in space can increase by a factor of  $10^2$  to  $10^6$  for hours and days. Such solar particle events are much more frequent during the active phase of the solar cycle. The maximum energy reached in solar particle events is typically 10 to 100 MeV, occasionally reaching 1 GeV (roughly once a year) to 10 GeV (roughly once a decade). Solar energetic particles can be used to measure the elemental and isotopic composition of the Sun, thereby complementing spectroscopic studies of solar material. The modulation effects caused by the Sun are divided into 3 types: Forbush Decreases, Geomagnetic Storms and Ground Level Enhancements. These effects can be seen in time series of ground based detectors that register the secondary flux of cosmic ray particles. These modulation effects, Aragats Space Environmental Center's ground based detectors that register them and also techniques developed within this dissertation for time series filtering and monitoring the quality of time series data are described in chapter 2 of this thesis.

Secondary flux of cosmic ray particles may be affected both with influence of the Sun and the variations of Earth's atmospheric conditions. As a cosmic ray enters the Earth's atmosphere, it encounters an increasing number of atoms and molecules, especially nitrogen and oxygen. Sooner or later the cosmic ray will collide with one of them. It can interact both with the electronic cloud (which has a diameter of  $10^{-10}$  m for an atom) and with the much smaller nucleus (with diameter of  $10^{-14}$  m). Because of the different sizes and the range of the interactions, the most frequent collisions involve the electronic cloud. Electrons are torn off by the electric field of the cosmic ray, and the atom or molecule gets ionized. Since electromagnetic forces act over large distances, ionization is frequent, but the energy loss of the incoming proton is minor in an individual interaction, and plays no role in the high atmosphere. The variation of atmospheric conditions (pressure, temperature) also can cause the variation of the flux of secondary particles. Besides that, as observed by our and many other high altitude groups, electric fields in the upper atmosphere during thunderstorms can cause changes in the amount and the energy spectra of the secondary particle flux. The description of enhancements in the cosmic ray data due to thunderstorm activity, the proof that there are no inducing signals during these enhancements in electronics of ASEC detectors are given in chapter 3 of this thesis. Besides that, the notion of neutron multiplicity of neutron monitors introduced several decades ago is described in this chapter as a feature for investigation of high energy EAS and thunderstorm neutrons.

After investigation of solar and atmospheric modulation effects in cosmic ray time series GLE alert algorithm for ASEC detectors, has been developed and realized within this dissertation. Chapter 4 covers the description of ASEC GLE alert system, its efficiency and false alarm probability.

