Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

на правах рукописи

БАРБАШИНА НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА

МЕТОД МЮОНОГРАФИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛИОСФЕРЫ, МАГНИТОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

01.04.01 – ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Автор:

Москва, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Условия жизни на Земле определяются тремя внешними сферами: атмосферой, магнитосферой и гелиосферой, состояние которых в значительной степени зависит от активности Солнца. Динамические процессы на Солнце создают возмущения в межпланетной среде. Эти возмущения распространяются в гелиосфере и могут достигать Земли, возмущая, в свою очередь, ее магнитосферу и атмосферу. Имеющаяся аппаратура позволяет своевременно обнаруживать различные солнечные процессы и ориентировочно оценивать направление движения возмущений, вызванных этими процессами. Но далее информация о них отсутствует и появляется только в момент прихода возмущений в район Земли, где регистрируется спутниками на геостационарной орбите.

Уникальную возможность обнаружения гелиосферных возмущений предоставляют космические лучи, которые при прохождении через гелиосферу будут испытывать влияние возмущений в солнечном ветре и в межпланетном магнитом поле. Учитывая, что время прохождения космических лучей через гелиосферу измеряется минутами, а гелиосферных возмущений – сутками, непрерывная регистрация потока космических лучей позволяет отслеживать мощные гелиосферные возмущения и определять направление их движения. Поэтому такой подход давно применяется в исследованиях гелиосферных и магнитосферных возмущений с использованием нейтронных мониторов и мюонных телескопов, расположенных на поверхности Земли.

Нейтронные мониторы регистрируют нейтроны, которые образуются в результате взаимодействия адронной компоненты космических лучей, достигающей поверхности Земли. Но в процессе замедления нейтронов полностью исчезает информация о направлении движения адронов, которые образовали эти нейтроны. Поэтому направление первичных частиц космических лучей определяется по максимуму углового распределения, т.е. соответствует вертикальному направлению. Из-за суточного вращения Земли условия наблюдения КЛ постоянно меняются: один нейтронный монитор не может быть постоянно ориентирован на Солнце. С начала 50-х годов прошлого столетия начала формироваться мировая сеть нейтронных мониторов, которая насчитывает около 50 детекторов по всему миру [1]. Совокупность таких детекторов позволяет перекрывать небесную сферу и обеспечивает регистрацию космических лучей с различных направлений. На портале NMDB [2] приведено описание установок и выложены данные, получаемые в режиме реального времени.

В отличие от нейтронов мюоны, которые образуются на больших высотах в атмосфере (~ 15 км) в результате взаимодействия первичных космических частиц с ядрами атомов воздуха и последующего распада вторичных мезонов, с хорошей точностью сохраняют направление движения первичных частиц. Это позволяет прослеживать траекторию этих частиц в магнитосфере и гелиосфере, используя данные о соответствующих магнитных полях. Такая связь открывает возможность решения другой обратной задачи – восстановления параметров возмущений в гелиосфере и магнитосфере путём анализа регистрируемых изменений характеристик потока мюонов.

Вместе с тем высота генерации вторичных частиц, распадающихся на мюоны, зависит от основных параметров атмосферы: давления и температуры, а также от различных возмущений в атмосфере, которые изменяют эти параметры. Родившиеся мюоны также взаимодействуют с атмосферой, а при не очень больших энергиях ещё и распадаются. Поэтому прохождение мюонов через атмосферу зависит как от давления и температуры, так и от влажности, а также от любых изменений этих параметров. Соответственно, это открывает возможность решения другой обратной задачи – определения изменений параметров атмосферы по изменениям характеристик потока мюонов.

Для регистрации мюонной компоненты были созданы многонаправленные мюонные телескопы (ММТ), которые могли регистрировать мюоны одновременно с различных направлений.

Первый мюонный телескоп был создан в 1957 году в Якутске в Институте космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера (ИКФИА СО РАН) [3,4] и состоял из пропорциональных газоразрядных счетчиков СИ-5Г (длиной 65.2 см и диаметром 6.3 см). С 1984 года регистрация осуществлялась с помощью газоразрядных счетчиков СГМ-14 (длиной 150 см и диаметром 15 см). Счетчики были размещены на различных уровнях под землей, чтобы разделить мюоны по энергиям. За время работы мюонного телескопа электроника установки обновлялась, увеличивалась эффективная площадь, при этом геометрия телескопов сохранялась. В настоящее время в комплекс детекторов космического излучения в Якутске входит четыре мюонных телескопа на газоразрядных счетчиках СГМ-14 и четыре сцинтилляционных мюонных телескопа SMT на счетчиках СЦ-301. Мюонные телескопы как на газоразрядных, так и на сцинтилляционных счетчиках установлены на четырёх уровнях: на Земле (0 м водного эквивалента) и на глубинах 7, 20 и 40 метров в.э. На рисунке В1 представлены фотографии телескопов. Регистрация мюонов телескопами на газоразрядных счетчиках основана на тройных совпадениях и осуществляется с пяти различных направлений, а на сцинтилляционных – на двойных совпадениях – с тринадцати различных направлений.

Рисунок В1. Мюонный телескоп МТ40 (слева, вверху), МТ20 (справа), сцинтилляционный мюонный телескоп (внизу) [4]

Каждый мюонный телескоп на газоразрядных счетчиках СГМ-14 состоит из пятидесяти двух счётчиков, расположенных на трех уровнях параллельно друг другу. В верхнем и нижнем уровне располагается 18 счетчиков, в среднем – 16, расстояние между верхним и нижним уровнем – 52 см. Эффективность счетчика СГМ-14 составляет 93 – 98 %. Всего регистрируется пять направлений прихода мюонов: вертикальное, северное и южное под зенитными углами 30° и 60° соответственно [4, 5].

Основу конструкции сцинтилляционного мюонного телескопа SMT составляют сцинтилляционные счётчики СЦ-301 (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино), которые представляют собой сцинтилляционные детекторы площадью 1 кв.м. с оптоволоконным съемом информации с помощью ФЭУ-115М. Телескоп состоит из двух слоев таких счётчиков, в каждом слое которого находится 8 детекторов, имеющих эффективную площадь 8 кв.м. [6]. Схема расположения счетчиков сцинтилляционного телескопа представлена на рисунке В2. Мюонные телескопы проработали в непрерывном режиме с 1957 по 2004 гг., после чего оборудование было перенесено на новое место и запущено в 2009 году [4].

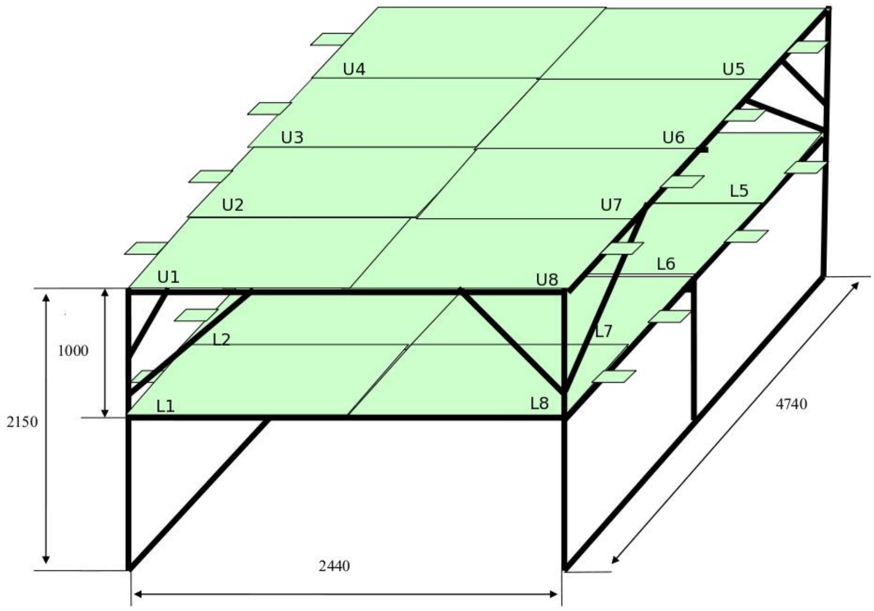


Рисунок В2. Схема расположения счетчиков сцинтилляционного телескопа [4]

По данным непрерывных наблюдений наземных и подземных (7, 20 и 60 м в. э.) интенсивностей мюонов космических лучей за период с 1972 по 2002 гг. изучены суточные вариации сидерического происхождения. В 2007 году в ИКФИА СО РАН была создана базовая модель модуляции КЛ в гелиосфере. В отличие от множества других моделей в ней присутствует только один подгоночный параметр – уровень остаточной турбулентности солнечного ветра. На основе этой модели удалось удовлетворительно объяснить наблюдаемую долговременную модуляцию интенсивности КЛ, в том числе и в прошедшем аномальном 23-м цикле солнечной активности [7]. На основе таких измерений проводятся прикладные работы по прогнозу космической погоды. Данные мониторинга анизотропии космических лучей в режиме реального времени доступны по ссылке [8, 9].

Следующим этапом развития отечественных мюонных телескопов стал многонаправленный мюонный телескоп, построенный в Новосибирске в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ СО РАН) в 1990 году. Данный телескоп в отличие от якутского телескопа состоит из пары двухкоординатных плоскостей, каждая из которых включает два слоя газоразрядных счетчиков, работающих в пропорциональном режиме и расположенных перпендикулярно относительно друг друга. В нижнем слое плоскости используется счётчик СГМ-14, в верхнем – СГМ-14-1 (длиной 210 см и диаметром 15 см). Таким образом, был сформирован матричный мюонный телескоп для регистрации космических лучей. Схема представительна на рисунке В3. В данном телескопе регистрация мюонов идет в семи зенитных угловых интервалах: 0°, 30°, 40°, 50°, 60°, 67° и 71°; соответствующие диаграммы направленности представлены на рисунке В3. Между плоскостями мюонного телескопа был размещен нейтронный монитор, что позволило разделять адронную и мюонную компоненты КЛ. Использование такой конструкции позволило перекрыть диапазон энергий от единиц до нескольких сотен ГэВ [10, 11, 12]. С помощью Новосибирского мюонного телескопа проведен ряд исследований по выявлению и учету атмосферных эффектов [13,14, 15].

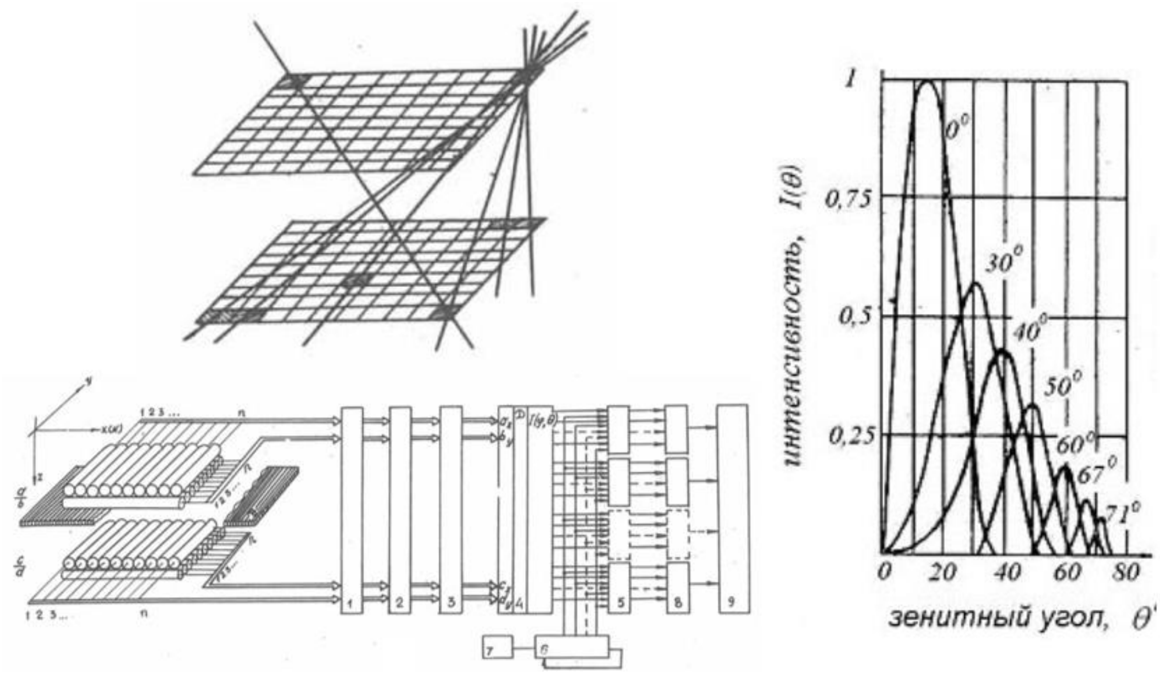


Рисунок В3. Схема расположения счётчиков в матричном мюонном телескопе и его диаграмма направленности [11]

Наиболее известным многонаправленными мюонным телескопом является мюонный телескоп в Нагое (NGY, Япония) с эффективной площадью 36 кв.м. [16], запущенный в 1970 году. Данный телескоп состоит их двух слоев сцинтилляционных счётчиков (площадь сцинтиллятора – 1 кв.м., толщина – 10 см), разнесенных по высоте на 1.73 м. В каждом слое находится 36 счётчиков, которые уложены в квадраты 6 × 6 кв.м. Светосбор в каждом счетчике осуществляется фотоэлектронным умножителем Hamamatsu Photonics R877. На рисунке В4 представлена схема мюонного телескопа [17]. Регистрация мюонов осуществляются со 121-го направления на основе схемы двойных совпадений.

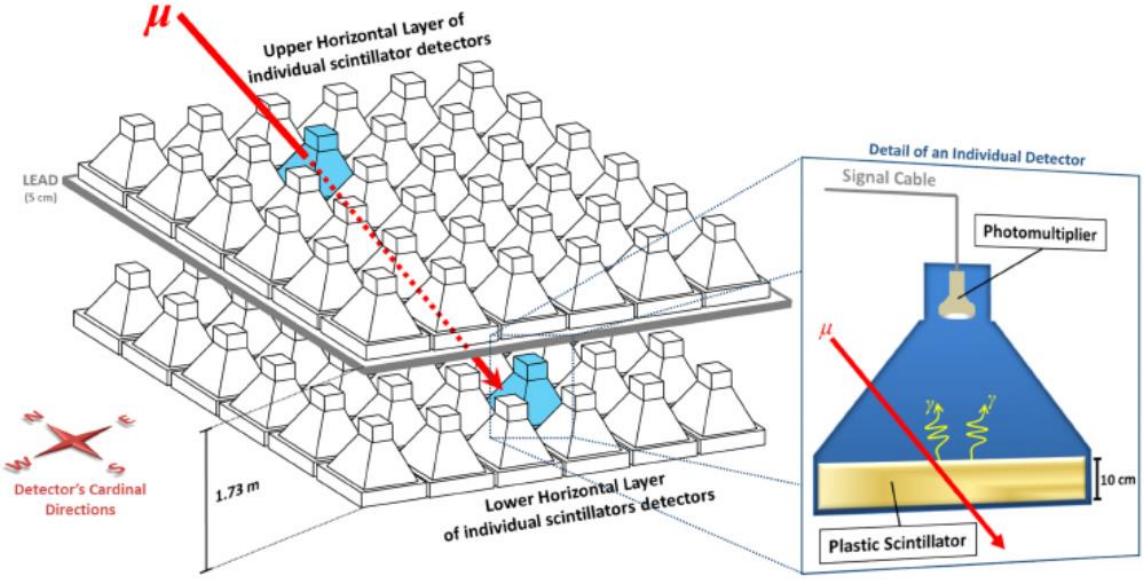


Рисунок В4. Схема мюонного телескопа в Нагоя [17]

Многонаправленный мюонный телескоп в Нагоя входит в глобальную сеть мюонных детекторов (Global Muon Detector Network – GMDN) [17, 18], в которую также входят телескопы, расположенные в Хобарте (Австралия) [19], в Кувейте (Кувейт) [20] и Сан-Мартинью-да-Серра (Бразилия) [21]. В таблице В1 представлены для сравнения текущие характеристики данных телескопов. Телескопы в Хобарте (HBT) и Сан-Мартинью-да-Серра (SMS) имеют схожую конструкцию, показанную на рисунке В4, но разное количество сцинтилляционных детекторов в слое (в HBT – 4 x 4, в SMS – 4 x 9).

Таблица В1. Характеристики многонаправленных мюонных телескопов GMDN

Станция	Площадь, м^2	Кол-во направлений	Кол-во слоев	Координаты расположения	Высота, м
Нагоя (NGY)	36	121	2	35.1°N/137.0°E	77
Хобарт(HBT)	16	49	2	42.9°S/147.4°E	30
Сан-Мартинью-да-Серра (SMS)	32	105	2	29.4°S/51.8°W	488
Кувейт (KWT)	9	529	2	29.3°N/48.0°E	30

Телескоп в Кувейте (KWT) состоит из двух координатных слоёв перекрещенных пропорциональных счётчиков (трубок). Схема детектора представлена на рисунке В5. Каждая трубка имеет длину 5 м и диаметр 10 см. Телескоп был создан в 2006 году и включал два слоя по 30 трубок в каждом, разнесенных между собой на 80 см. Сверху расположен свинцовый экран толщиной 5 см. В конце апреля 2015 года количество X и Y трубок увеличилось до 43 и 50 соответственно, а в 2016 году – до 50 и 50.

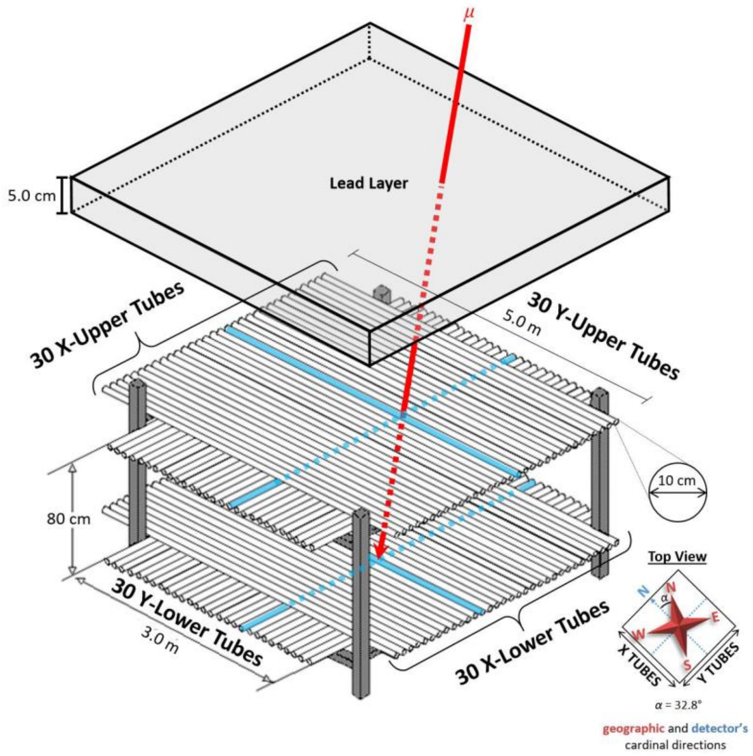


Рисунок В5. Схема мюонного телескопа в Кувейте [17]

Данные GMDN публикуются в сети Интернет для открытого доступа [22]. На рисунке В6 показана карта асимптотических направлений мюонных телескопов сети GDMN [23].

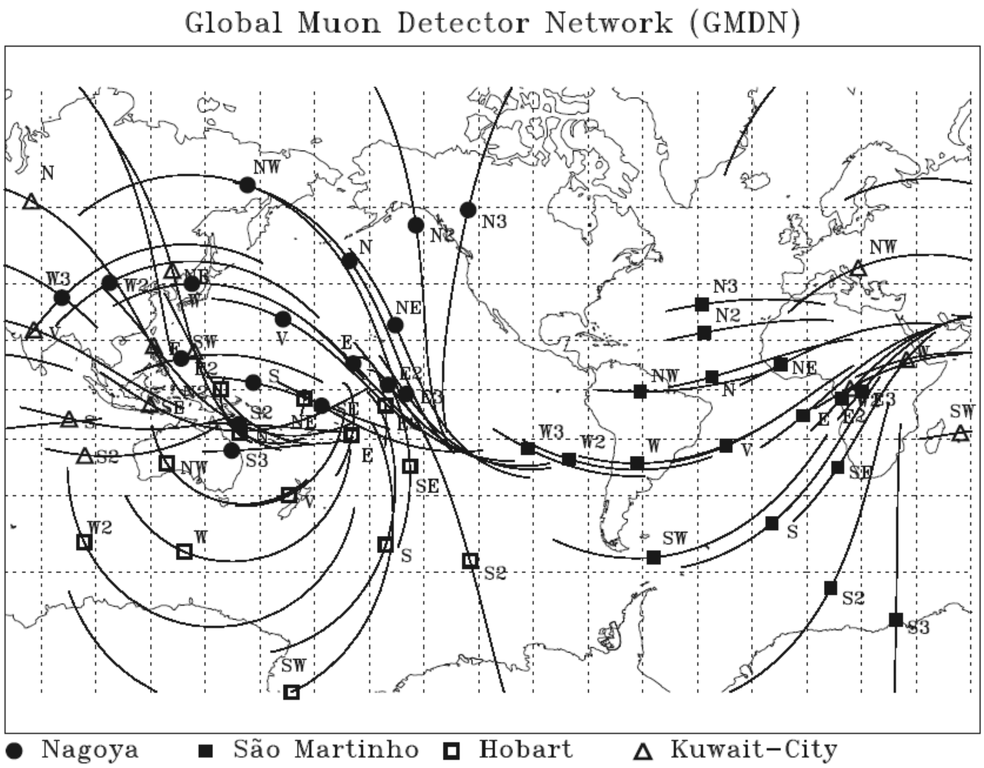


Рисунок В6. Карта асимптотических направлений GDMN [23]

Исследования, проводимые с помощью сети многонаправленных мюонных телескопов, можно условно разделить на три части:

1. методические исследования;
2. исследование анизотропии космических лучей;
3. изучение модуляций космических лучей и гелиосферных возмущений.

Первый обзор [24] на исследование геомагнитных возмущений с помощью сети мюонных телескопов включает 14 "больших" геомагнитных бурь (*Kp*≥ 8) а также 25 больших бурь (Kp ≥ 7), наблюдавшихся с 1992 по 1998 гг. В работе рассматривались часовые скорости счёта мюонов и отклонения часовой скорости счёта, зарегистрированной *j*-м направленным телескопом в *i*-м детекторе, от средней скорости счёта. После устранения событий, для которых сеть мюонных телескопов имела неполный охват направленного к Солнцу межпланетного магнитного поля (ММП), было показано, что 15 из 22 событий (68%) имели идентифицируемые предвестники с типичными временами упреждения в пределах от 6 до 9 часов до штормового внезапного начала (SSC).

В работах [25, 26, 27] была проведена оценка геометрии КВМ с помощью анализа анизотропии космических лучей. Анализировались данные мюонных телескопов Нагоя, Хобарт и Сан-Мартинью. Плотность космических лучей рассматривалась как функция от времени и трёх компонентов вектора анизотропии в пространстве, скорректированного на конвекцию солнечного ветра. В результате было показано, что геометрия КВМ близка к цилиндрической (рисунок В7).

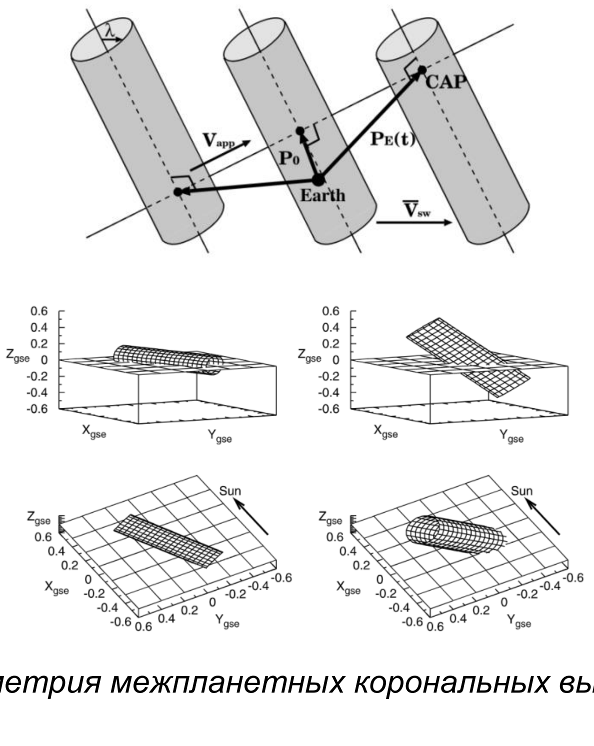


Рисунок В7. Геометрия межпланетных корональных выбросов масс [27]

Наиболее ярким проявлением возмущений в межпланетной среде являются форбуш-эффекты (или форбуш-понижения), исследования которых ведутся уже более 80 лет [28, 29, 30]. Так, в работе [31] рассматривается форбуш-понижение14 декабря 2006 года по данным GMDN. Было получено указание на присутствие предвестника перед приходом КВМ к Земле путем использования “двумерного отображения” интенсивности космического излучения после удаления вклада от дневной анизотропии (рисунок В8).

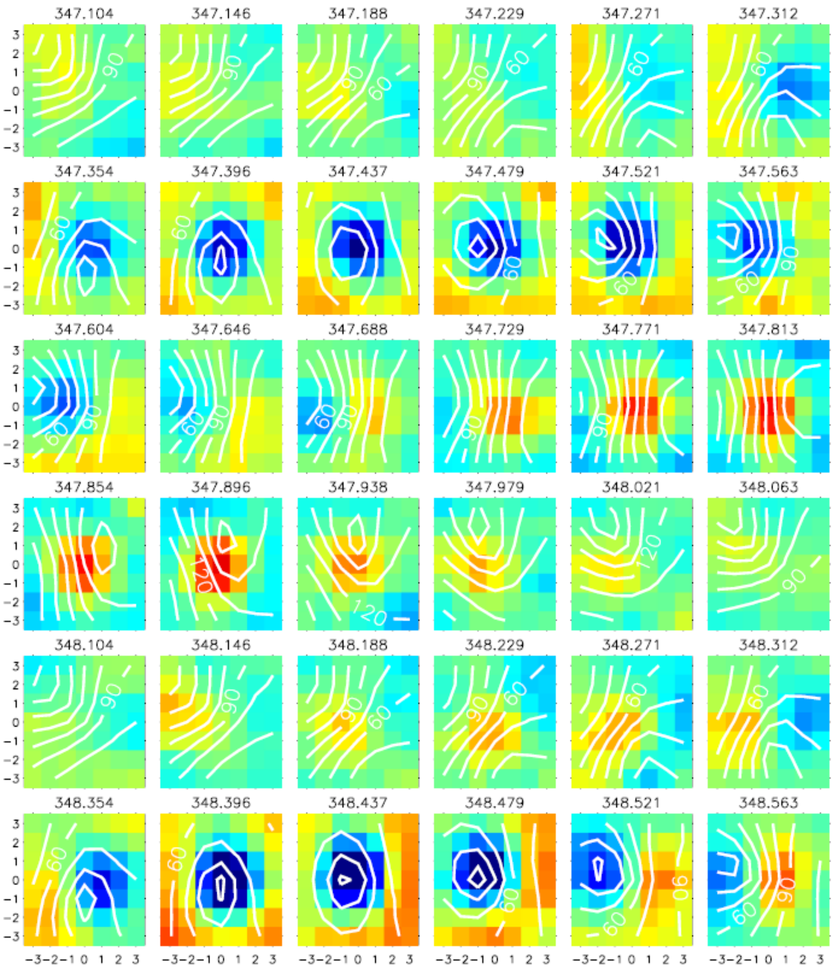


Рисунок В8. Пример 2D-отображений, наблюдаемых GMDN (SMS) 13 и 14 декабря 2006 года, которые предшествуют приходу SSC. Каждая малая квадратная панель выделяет "значение" в 1 часе в закодированном цветом формате как функция k и l на горизонтальных и вертикальных осях. Красный (синий) цвет обозначает излишек (дефицит) интенсивности в (k, l) пикселе относительно средней интенсивности излучения по всем направлениям (цветная шкала установлена в ±5 отклонений в стат. погрешностях), белой кривой показана контурная линия питч-угла, измеренного от направленного к Солнцу ММП и расчетного направления космических лучей медианной энергии в каждом пикселе

Особенность этого явления (рисунок B8) в том, что слабая сигнатура конуса потерь (LC) была зарегистрирована более чем за день до штормового начала (SSC). Предвестник LC появился через 7 часов после начала КВМ. Был найден предвестник, последовательно наблюдаемый с других телескопов сети, что подтверждает постоянное существование предвестника в межпланетном пространстве. Большое время упреждения (15.6 часа) этого предвестника, которое почти вдвое больше типичного значения, указывает, что межпланетное магнитное поле (ММП) было более тихим в этом событии, чем типичная турбулентность ММП. Амплитуда (-6.45%) LC-анизотропии в момент SSC более чем в два раза выше амплитуды ФП и указывает на то, что максимальное понижение интенсивности позади области шока является намного большим, чем амплитуда ФП, зарегистрированная на Земле в этом событии. Это первое детальное наблюдение мюонными детекторами предвестника фронта ударной волны.

В настоящее время данные сети мюонных телескопов GMDN активно используются и дополняют данные сети нейтронных мониторов. В работе [32] дано описание мониторинга космической погоды в реальном времени с помощью сети мюонных и нейтронных детекторов. Данные в онлайн-режиме выводятся на веб-страницу [33] в сети Интернет. На рисунке B9 представлены примеры отображаемых результатов мониторинга космической погоды в реальном времени. На графиках (a) и (b) верхнего и нижнего блоков рисунка B9 выводится информация о параметрах межпланетного магнитного поля, солнечного ветра, Kp-индексе и плотности космических лучей. Кругами (поле (c)) на верхнем блоке рисунка выводится информация об относительной интенсивности космических лучей (красные и синие круги обозначают дефицит и избыток интенсивности соответственно, а радиус круга зависит от величины дефицита или избытка). В поле (d) показана аналогичная информация, но после вычитания анизотропии первого порядка. На нижнем блоке на рисунках (c и d) показано направление потока космических лучей, спроецированное на плоскость эклиптики и плоскость, располагающуюся перпендикулярно линии Солнце-Земля.

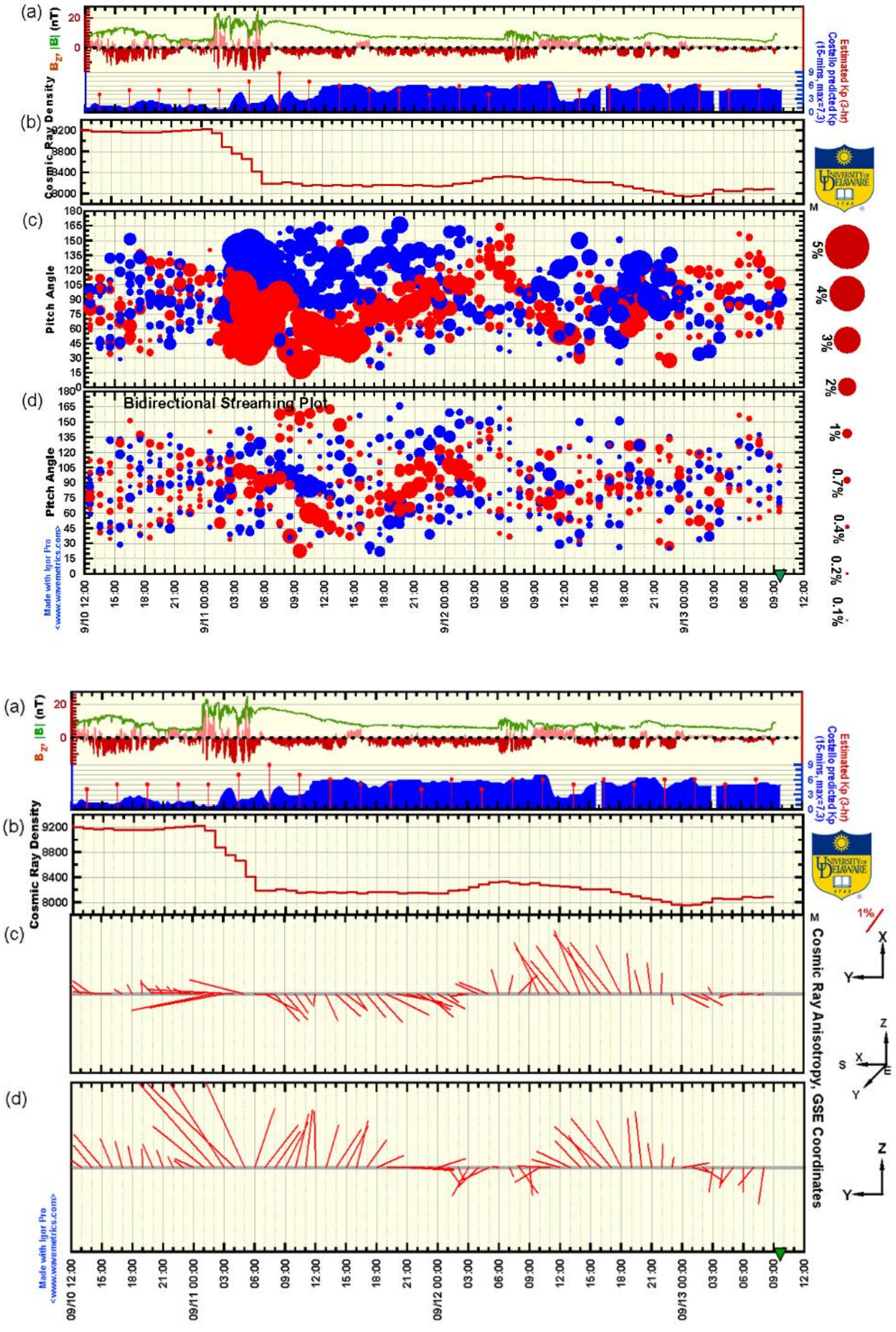


Рисунок В9. Пример отображаемых результатов мониторинга космической погоды в реальном времени

Следующим этапом развития мюонных телескопов стало создание телескопов с высокой степенью грануляции. Таким стал мюонный телескоп в Норикура (Япония) [34]. Он создавался по матричному типу и регистрировал мюоны с 1681-го направления. Телескоп начал свою работу в 1998 году. Регистрирующая система данного мюонного телескопа основана на пропорциональных газоразрядных счётчиках длиной 5 м и диаметром 10 см. Телескоп состоит из двух плоскостей, каждая из которых имеет два взаимно ортогональных слоя. Для подавления мягкой компоненты КЛ над верхним слоем размещен свинцовый поглотитель толщиной 5 см. Регистрация частиц осуществляется по совпадению срабатывания счётчиков в 4-х слоях детектора. Диапазон измерения зенитных углов составляет от 0° до 55°, угловое разрешение – около 7°.

В работах [35, 36, 37] представлены результаты анализа форбуш-понижений на основе анализа данных мюонного телескопа Норикура. На рисунке В10 представлено событие, которое произошло 28 октября 2003 года [37]. На рисунках изображено распределение потока мюонов по 121-му направлению (11 × 11 направлений) детектора Норикура. Каждое изображение – почасовое распределение интенсивности мюонов. Цвет обозначает относительную интенсивность потока космических лучей. Вертикальная ось соответствует направлению от севера (сверху) к югу (вниз), горизонтальная ось – направлению от востока (справа) к западу (слева). Питч-угол, измеренный от наблюдаемого направления ММП, показан контурными линиями. Таким образом, было продемонстрировано распределение потока космических лучей в пространстве, измеренных с помощью многонаправленного мюонного телескопа.

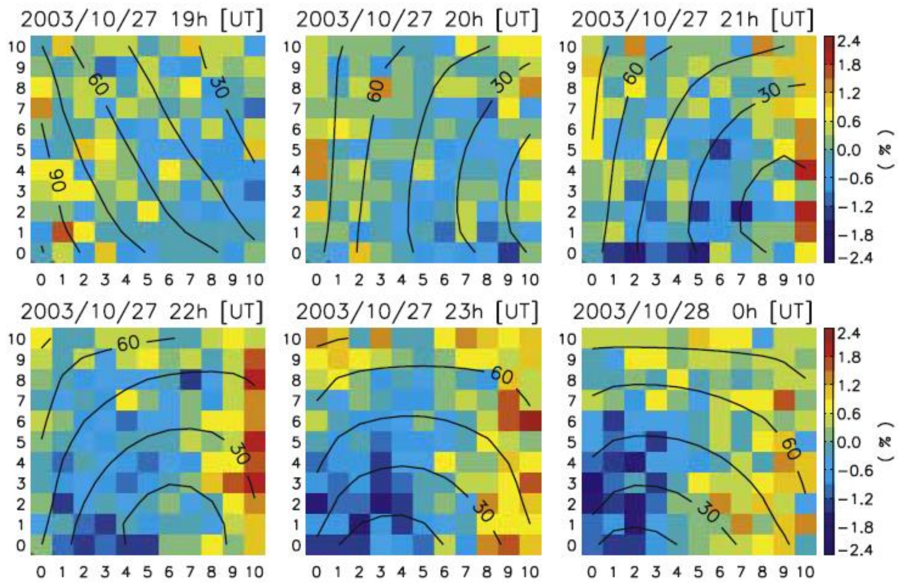


Рисунок В10. Распределение интенсивности потока мюонов по 121-му направлению по данным детектора Норикура [37]

Для космофизических исследований также активно используются мюонные детекторы, которые создавались в составе больших установок для регистрации широких атмосферных ливней, а также для ускорительных экспериментов. Среди них можно выделить установки GRAND (США) [38], GRAPES-3 (Индия) [39] и L3 в CERN (Швейцария) [40]. Наиболее известным из них является многонаправленный телескоп установки GRAPES-3, построенный на основе пропорциональных счётчиков длиной 6 м и сечением 10 × 10 кв. см. Многонаправленный телескоп построен на модульном принципе. Он состоит их четырёх мюонный станций, каждая из которых включает четыре модуля, формирующихся из двух пар слоев ортогонально ориентированных счетчиков с бетонным поглотителем. Общая площадь установки 560 кв.м. Данный мюонный телескоп является частью установки для исследования состава первичных космических лучей. Указанная установка также включает в себя 380 сцинтилляционных счётчиков для регистрации ШАЛ. С 2001 года телескоп используется и для исследования вариаций космических лучей, связанных с изменениями в межпланетном пространстве. С помощью установки были проведены измерения турбулентного магнитного поля в области ударной оболочки в корональных выбросах массы с использованием данных о мюонах с различной жесткостью, измерения солнечной суточной анизотропии и ее высших гармоник, включая зависимость от жесткости, а также измерения антикорреляции между изменениями скорости солнечного ветра и интенсивности космических лучей [41].

Среди систем мюонных детекторов можно также выделить сеть мюонных детекторов SEVAN (Space Environment Viewing and Analysis Network), спроектированную для предсказания геомагнитных бурь и других возмущений еще до момента регистрации КВМ космическими аппаратами [42, 43]. На рисунке В11 представлена принципиальная схема детектора. Детектор сети SEVAN собирается из стандартных пластин пластикового сцинтиллятора размерами 50 × 50 × 5 куб. см. Между двумя сборками из четырёх пластин (100 × 100 × 5 куб. см) расположены два свинцовых поглотителя (100 × 100 × 4.5 куб. см) и одна сборка из стандартных сцинтилляционных пластин (50 × 50 × 20 куб. см).

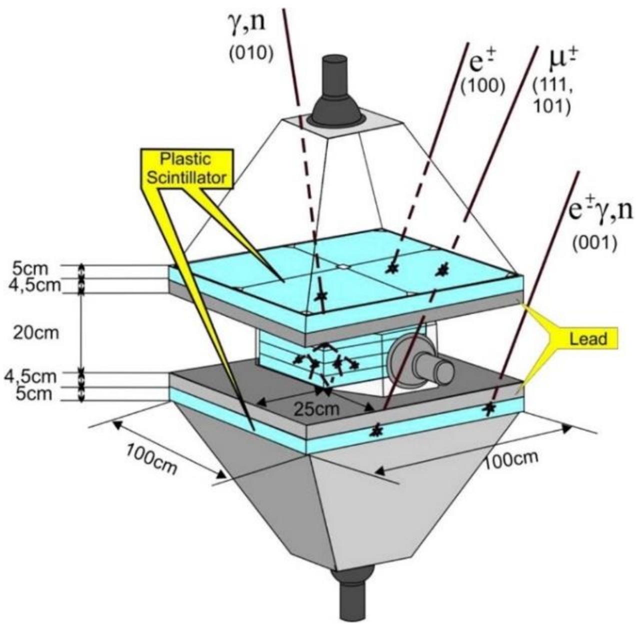


Рисунок В11. Модуль сети SEVAN

Сцинтилляционные пластины просматриваются тремя ФЭУ. Данные, получаемые модулем, представляют собой одноминутные скорости счета трёх сцинтилляторов. Различные комбинации сигналов позволяют выделять различные типы частиц, которые определяются, исходя из комбинации сработавших ФЭУ. Благодаря прослойке свинца точность отбора мюонов составляет ~95%. Энергия частицы, прошедшей все слои и зарегистрированной в них, составляет ~250 МэВ. С 2008 по 2017 гг. модули сети были установлены на станциях в Ереване (Армения), в Нор-Амберде (Армения), на Арагаце (Армения), в Мусале (Болгария), в Загребе (Хорватия), в Ломницки-Штите (Словакия), в Нью-Дели (Индия), а также на горе Милесовка (Чехия). С помощью этих детекторов ведутся исследования форбуш-эффектов [44] и различных типов заряженных структур в атмосферном электрическом поле [45,46].

Серди детекторов космического излучения, созданных в последние десятилетия, можно выделить проекты TRAGALDABAS [47, 48], MuSTAnG [49,50], AMMM [51, 52] и NAMMM [53].

Детектор TRAGALDABAS [47] является прототипом детектора Trasgo, предназначенным для регистрации широких атмосферных ливней [48]. TRAGALDABAS был создан в 2013 году в университете Сантьяго-де-Компостела в Испании и работает в тестовом режиме. Он имеет малую площадь (~2 кв. м) и состоит из пары двухкоординатных плоскостей резистивных плоских камер, разнесённых на расстояние ~1.2 м с эффективной площадью 1.2 x 1.5 кв. м (угловое разрешение детектора ~2° – 3°).

Детектор MuSTAnG [49] был создан в 2008 году в университете Грейфсвальд в Германии и в 2014 году перевезен в Киль [50]. Он состоит из двух плоскостей, разнесенных друг от друга на 95 см, содержащих по 16 сцинтилляционных детекторов каждая, которые размещены в квадрате общей площадью 4 кв. м. Размеры сцинтилляционной пластины одного детектора – 50 × 50 кв. см, толщина – 5 см. Светосбор осуществляется спектросмещающим оптоволокном. Между плоскостями для поглощения мягкой компоненты КЛ размещен свинцовый поглотитель. Регистрация потока частиц осуществляется с 13 направлений, угловое разрешение ~20° – 30°.

Детектор АММ [51, 52] (3200 м н.у.м) – Арагацский многонаправленный мюонный монитор – был запущен в 2002 году в Армении и модифицирован в 2006 году. В 2018 году эксперимент был остановлен. АМММ состоит из двух слоев сцинтилляционных детекторов, разделённых толщиной вещества. 29 сцинтилляционных детекторов площадью 1 кв. м и толщиной 5 см расположены на верхней части бетонного калориметра ANI. Ещё 90 детекторов того же типа расположены под ним на глубине 24-х метров (6 м бетона с прослойками воздуха (всего 10 м), 7 м грунта, 7 м воздуха). На рисунке В12 представлена принципиальная схема установки АМММ. Такое расположение позволяет отделять жесткую и мягкую компоненту космического излучения. Относительная точность одноминутных скоростей счета подземного мюонного детектора составляет ~0.2%, мюонов и электронов низких энергий на поверхности ~0.12%.

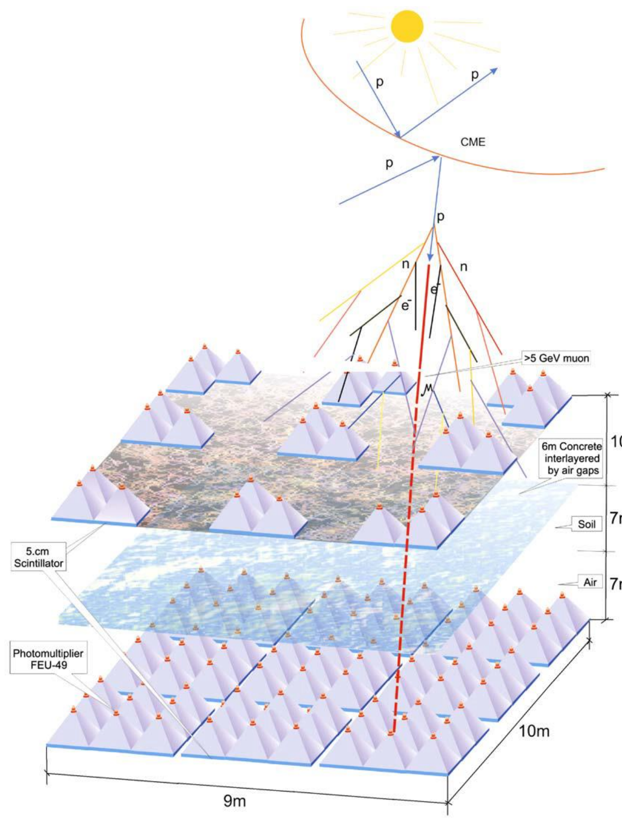


Рисунок В12. Принципиальная схема детектора АМММ

Детектор NAMMM [53] (Nor-Amberd Multidirectional Muon Monitor) был задуман для расширения сети мюонных телескопов GMDN. NAMMM (2000 м н.у.м.) работает с 2002 года. Он состоит из двух слоев пластиковых сцинтилляторов, расположенных над и под секциями Нор-Амбердского нейтронного монитора. Свинцовый фильтр нейтронного монитора поглощает электроны и мюоны низкой энергии. На рисунке В13 представлена принципиальная схема его установки. Каждый слой состоит из шести сцинтилляционных счетчиков с площадью 0.81 кв. м. Система сбора данных NAMMM может регистрировать все совпадения сигналов детекторов от верхнего и нижнего слоев, что позволяет проводить измерения мюонов, приходящих с разных направлений.

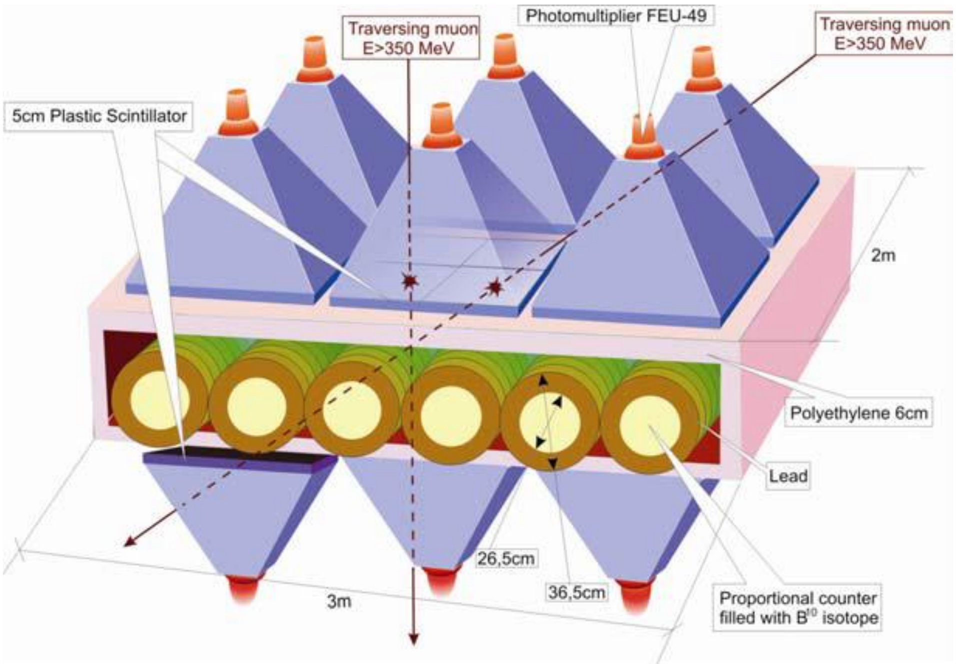


Рисунок В13. Принципиальная схема детектора NAMMM

Важно отметить, что существующие многонаправленные мюонные телескопы имеют низкое угловое разрешение (~ 10° и более), которое обусловлено их конструкцией. Для детального исследования характеристик потока мюонов на поверхности Земли и их изменений, вызванных различными процессами как в гелиосфере и магнитосфере, так и в атмосфере Земли, требуются детекторы с более высоким угловым разрешением. Лучше всего для этой цели подходят мюонные годоскопы (МГ), основное отличие которых от ММТ заключается в возможности восстанавливать трек каждого зарегистрированного мюона. Из таких треков можно формировать любое угловое матрицы за период времени, определяемый характером решаемых задач.

Первый мюонный годоскоп ТЕМП, предназначенный для исследований гелиосферных событий, вызванных солнечной активностью, был создан в МИФИ в 1995 году [54]. Годоскоп представляет собой мюонный детектор, состоящий из четырех слоев сцинтилляционных стрипов, из которых сформированы две координатные плоскости (рисунок В14). Каждый слой состоит из 128 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой полоски-стрипы пластического сцинтиллятора длиной 3 м и сечением 1×2.5 кв. см. Регистрация световых сцинтилляционных вспышек осуществляется с одного торца стрипа с помощью ФЭУ-85. Общая площадь установки составляет 9 кв.м. Мюонный годоскоп ТЕМП установлен в подвальном помещении экспериментального комплекса НЕВОД (ЭК НЕВОД) с экранировкой перекрытиями здания, эквивалентной двум метрам в.э. С помощью этого мюонного годоскопа были получены первые результаты по исследованию вариаций потока мюонов, связанных с динамическими процессами в атмосфере [55] и гелиосфере [56].

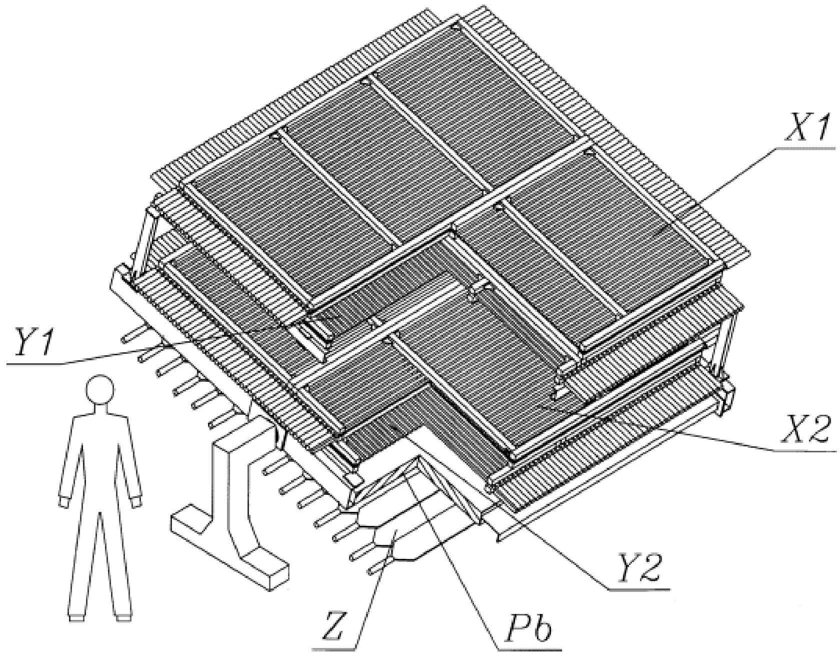


Рисунок В14. Принципиальная схема детектора *ТЕМП*

Исследования, проведенные с помощью мюонного годоскопа ТЕМП, положили начало развитию мюонной диагностики [57, 58, 59], представляющей собой совокупность методов удаленного мониторинга различных возмущений в окружающем пространстве на основе регистрации мюонов в режиме реального времени практически со всех направлений небесной полусферы [60, 61, 62].

С появлением в 2006 году нового мюонного годоскопа УРАГАН [63, 64] получил развитие новый метод диагностики окружающего пространства – мюонография. Термин «мюонография» был введен по аналогии с устоявшими терминами, описывающими методы изучения объектов различными типами проникающего излучения, а именно: рентгенография, электронография, нейтронография и т.п. Мюонография – исследование различных объектов в естественном потоке мюонов космических лучей с использованием их проникающей способности [65, 66].

В диссертации рассматриваются основные аспекты и особенности применения нового метода мюонографии для исследований гелиосферы, магнитосферы, атмосферы Земли, а также обсуждаются результаты исследований, которые были проведены за 11-летний цикл солнечной активности на установке УРАГАН, являющейся первой и долгое время остававшейся единственным в мире мюонным годоскопом, удовлетворяющим всем требованиям исследований методом мюонографии.

Цель работы

Разработка и развитие новых подходов к исследованию космического и околоземного пространства, а также методов заблаговременного обнаружения потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.

Научная новизна

Метод мюонографии так же важен, как и методы рентгенографии, электронографии, нейтронографии и протонографии, поскольку открывает новые области использования мюонной компоненты космических лучей для раннего обнаружения, мониторинга и предсказания дальнейшего развития потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.

Применение метода мюонографии позволило выявить качественно новые закономерности в вариациях потока мюонов космических лучей во время развития возмущений в космическом и околоземном пространстве, а именно:

- впервые получены мюонографии событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах: GLE, форбуш-понижений и грозовых аномалий;
- впервые введена в методику анализа событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах, горизонтальная проекция вектора относительной анизотропии потока мюонов и показано, что ее изменения могут служить предвестником геоэффективных событий;

- впервые изучены долговременные вариации проекций вектора локальной анизотропии потока мюонов космических лучей;
- впервые с помощью одной установки и в рамках единого подхода определены интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики вариаций потока мюонов во время событий GLE и форбуш-понижений;
- впервые на основе мюонографий и карт метеорологических доплеровских радаров показано, что параметры анизотропии потока мюонов позволяют идентифицировать грозовые явления с вероятностью ~70%, а при прохождении атмосферных фронтов – более 80%.

Практическая значимость

Метод мюонографии окружающего пространства является новым источником информации о процессах как космического, так и атмосферного масштабов.

Способ и устройство для получения мюонографий могут быть использованы при проектировании новых мюонных годоскопов и анализе их экспериментальных данных.

Разработанные методы комплексного анализа данных по исследованию вариаций потока мюонов космических лучей, зарегистрированных мюонным годоскопом, во время возмущений в космическом и околоземном пространствах могут быть использованы для анализа подобных событий, регистрируемых другими детекторами.

Многолетние экспериментальные данные могут быть использованы для проверки моделей прохождения космических лучей с энергиями выше 10 ГэВ через гелиосферу и околоземное пространство, а также в прикладных задачах, связанных с дистанционным мониторингом гелиосферных возмущений.

Изменение параметров локальной анизотропии потока мюонов являются хорошим предвестником потенциально опасных процессов в магнитосфере и атмосфере Земли.

Полученные результаты лягут в основу развития сети мюонных годоскопов для непрерывного наблюдения за солнечными событиями, возмущениями в магнитном поле и атмосфере Земли.

Научная новизна и практическая значимость самого метода мюонографии и способов обнаружения гелиосферных и атмосферных возмущений подтверждены двумя патентами на изобретения [65, 67], двумя патентами на полезные модели [68, 69] и двумя свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ [70, 71]. В приложении представлены перспективы развития применения метода мюонографии для диагностики окружающего пространства с помощью развития сети мюонных годоскопов.

Достоверность

Экспериментальные результаты получены на трех независимо работающих супермодулях мюонного годоскопа УРАГАН, которые демонстрируют хорошую идентичность всех наблюдаемых явлений.

Сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными нейтронных мониторов, полученными во время различных гелиосферных и магнитосферных явлений в пересекающихся областях асимптотических направлений, показало их высокую степень согласованности.

Сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными метеорологических доплеровских радаров, полученными во время гроз в Московском регионе, показало их хорошее согалсие.

Личный вклад

Автор участвовал в разработке и создании мюонного годоскопа УРАГАН, проведении и обеспечении непрерывности длительного эксперимента в период с 2005 по 2020 гг. Автор внес весомый вклад в разработку методов исследования вариаций потока мюонов по данным мюонных годоскопов, на основе которых был разработан метод мюонографии. Автором разработаны алгоритмы для комплекса программ обработки и анализа вариаций потока мюонов во время атмосферных, магнитосферных и гелиосферных событий, а также унифицированные формы исследуемых событий. Автором получены интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики потока мюонов космических лучей в области энергий выше 10 ГэВ во время магнитосферных и гелиосферных возмущений. Автором проанализированы корреляции между характеристиками потока мюонов и параметрами атмосферных, магнитосферных и гелиосферных возмущений в исследуемые периоды и оценен прогностический потенциал данных по анизотропии потока мюонов. По инициативе автора и при его непосредственном участии было проведено сопоставление мюонографий с картами метеорологических доплеровских радаров во время грозовых явлений. Автором подготовлены статьи и представлены доклады по результатам исследований вариаций потока мюонов, зарегистрированных мюонным годоскопом во время событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах.

Автор защищает

1. Понятие и концепцию мюонографии – дистанционного метода исследования космического и околоземного пространства в потоке мюонов космических лучей.
2. Разработанные методы обработки двумерных угловых матриц экспериментальных данных мюонного годоскопа УРАГАН.
3. Результаты обработки временных рядов матричных данных (мюонографий), полученных в 2007 – 2020 гг. и содержащих ~1.5 триллиона зарегистрированных мюонов.
4. Методы выявления гелиосферных событий по форбуш-понижениям, зарегистрированных в потоке мюонов, и результаты анализа более ста таких событий за 2007 – 2020 гг.
5. Количественные параметры, описывающие мюонографии: вектор относительной анизотропии потока мюонов космических лучей, его горизонтальную проекцию r_h и проекции на географический юг (r_S) и восток (r_E), указывающие на анизотропию потока мюонов по азимутальным направлениям.
6. Интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики вариаций потока мюонов во время событий GLE и форбуш-понижений по данным мюонного годоскопа, которые впервые определены с помощью одной установки и в рамках единого подхода.
7. GSE-отображения деформаций углового распределения на основе анализа последовательностей мюонографий для гелиосферных возмущений, вызванных корональными выбросами масс, особенности регистрации геоэффектиных и негеоэффектиных КВМ в различные периоды солнечной активности.
8. Результаты анализа корреляций вариаций потока первичных космических лучей и параметров локальной анизотропии потока мюонов, регистрируемого мюонным годоскопом УРАГАН, которые показали, что их изменения происходят за 1 – 2 суток до прихода гелиосфеных возмущений в район Земли.
9. Мюонографии грозовых явлений в атмосфере и результаты их сопоставления с данными радарных наблюдений, которые продемонстрировали их хорошее согласие.

Апробация

Результаты работы были доложены на 42 международных и российских конференциях:

- Международной конференции по космическим лучам (International Cosmic Ray Conference – ICRC 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017);
- Европейском симпозиуме по космическим лучам (European Cosmic Ray Symposium – ECRS 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018);
- Международной конференции по физике частиц и астрофизике (International conference on particle physics and astrophysics – ICPPA 2015, 2016, 2018, 2020);
- Международном симпозиуме по грозам и ускорению элементарных частиц (Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration – TEPA-2016);
- Международном симпозиуме по космическим лучам и астрофизике (International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics – ISCRA 2017, 2019, 2021);
- Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ – 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020);
- Научной сессии НИЯУ МИФИ (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014);
- Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (БМШ ЭТФ – 2007, 2008, 2009, 2010).

По методу мюонографии автор выступал с приглашенными докладами на пленарных заседаниях трех международных конференций.

По теме диссертационной работы опубликовано 44 научных труда, из которых 36 трудов входят в список Scopus/Web of Science, 15 – в реферируемые научные издания из списка ВАК, 6 являются результатами интеллектуальной деятельности.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем работы составляет 197 страниц. В диссертации содержится 140 рисунков, 12 таблиц и одно приложение. Список литературы содержит 160 наименований.

Во **Введении** сделан обзор детекторов и установок для регистрации мюонов космических лучей на поверхности Земли, а также освещено современного состояния проводимых на них исследований, сформулирована цель диссертационной работы, обоснована ее актуальность, научная новизна и практическая значимость, подтверждена достоверность полученных результатов, представлены научные положения, которые выносятся на защиту, продемонстрирована их апробация в докладах на международных и всероссийских конференциях и в публикациях, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** представлено описание мюонного годоскопа УРАГАН, включая его регистрирующую систему, дано описание метода построения мюонографий. Представлены характеристики локальной анизотропии потока мюонов космических лучей, описывающие мюонографии.

Во **второй главе** анализируются долговременные вариации космических лучей по данным мюонного годоскопа УРАГАН, полученные за 14-летний период с 2007 по 2020 гг. Приводится сравнительный анализ с данными нейтронных мониторов в Москве и Апатитах, а также корреляционный анализ параметров потока космических лучей с характеристиками межпланетного магнитного поля и околоземного пространства.

В **третьей главе** рассматривается применение мюонографии для исследований событий типа GLE. Приводятся результаты анализа событий GLE, произошедших в конце 23-го и в 24-м солнечных циклах, а именно: GLE #70, 71 и 72. Отдельное внимание уделяется рассмотрению событий класса sub-GLE.

В **четвертой главе** рассматривается применение мюонографий для исследований форбуш-понижений. Приводятся результаты исследований пространственно-угловых и энергетических характеристик форбуш-понижений в период с 2007 по 2018 гг.

В **пятой главе** рассматривается применение мюонографий для исследований корональных выбросов масс и возмущений высокоскоростного солнечного ветра, источником которых являются корональные дыры на Солнце. Приводятся результаты применения метода мюонографии при исследовании геоэффективных и негеоэффективных КВМ, рассматривается возможность заблаговременного обнаружения возмущений в околоземном пространстве, в том числе в магнитосфере Земле.

В **шестой главе** рассматривается применение мюонографий для исследований в атмосфере Земли. Приводятся результаты исследований крупномасштабных барических образований (циклонов, фронтов и др.), проходящих над Москвой. Рассматривается сравнение мюонографий с данными доплеровского метеорадара DMRL-C, полученными во время грозовых явлений.

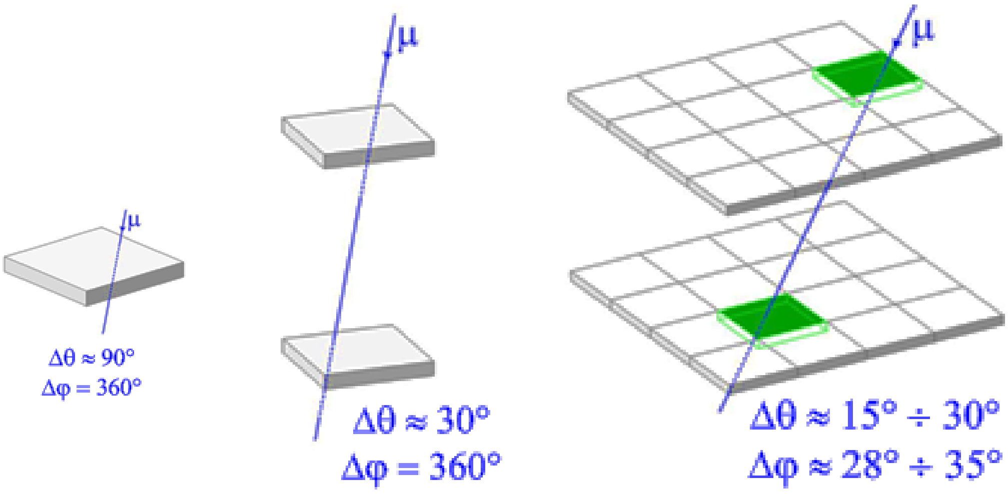
В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ГЛАВА 1. МЮОНОГРАФИЯ – НОВЫЙ МЕТОД МЮОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

О возможности использования проникающей способности мюонов для исследования различных объектов заговорили вскоре после открытия этих частиц. В первых экспериментах по поглощению потока мюонов оценивалась толщина вещества над мюонным детектором. Затем, по мере развития мюонных детекторов и понимания процессов их генерации и взаимодействия с веществом, это направление, получившее впоследствии название мюонной диагностики, постепенно расширялось, распространяясь на другие объекты изучения.

1.1. Мюонные детекторы и телескопы

В экспериментах по регистрации мюонов космических лучей, как правило, применяют газовые или сцинтилляционные детекторы, которые регистрируют помимо мюонов и другие частицы, в том числе электроны и гамма-кванты. К тому же такой детектор не может определить направление прихода частиц – он регистрирует частицы со многих направлений ($\Delta\varphi = 360°$, $\Delta\theta \approx 90°$), то есть дает общую картину о количестве частиц в данном месте регистрации. Для регистрации мюонов с определенных направлений применяют мюонные телескопы. Обычно мюонный телескоп представляет собой пару мюонных детекторов, разнесенных на некоторое расстояние и работающих по схеме совпадений. Это позволяет ограничить интервалы зенитных и азимутальных углов и регистрировать частицы с определенного диапазона направлений. Для подавления мягкой компоненты КЛ (электроны, гамма-кванты) используется поглотитель, например слой свинца. Такие мюонные телескопы регистрируют частицы с точностью $\Delta\theta \approx 30°$ (определяется размерами мюонных детекторов и местом их расположения относительно друг друга, в том числе и расстоянием). Для одновременной регистрации потоков частиц с различных направлений применяют многонаправленные мюонные телескопы (подробный обзор представлен во Введении). Современные многонаправленные телескопы имеют хорошие характеристики. Угловое разрешение достигает 7°, а количество направлений, с которых осуществляется регистрация, исчисляется сотнями и даже тысячами. Как правило, многонаправленные мюонные телескопы формируются из двух регистрирующих плоскостей. На рисунке 1.1 демонстрируется схематичное представление мюонного детектора, мюонного телескопа и многонаправленного мюонного телескопа.



а б в

Рисунок 1.1. Схематичное представление мюонного детектора (а), мюонного телескопа (б) и многонаправленного мюонного телескопа (в)

Возможности многонаправленных мюонных телескопов ограничены их конструкцией. На рисунке 1.2. представлена схема формирования направлений регистрации частиц в многонаправленном телескопе на примере телескопа в Нагоя [72]. На верхнем рисунке показано формирование направлений относительно детектора L23. На нижнем рисунке представлена матрица пространственных ячеек в плоскости детектора, в которые объединяются экспериментальные данные относительно детектора L23.

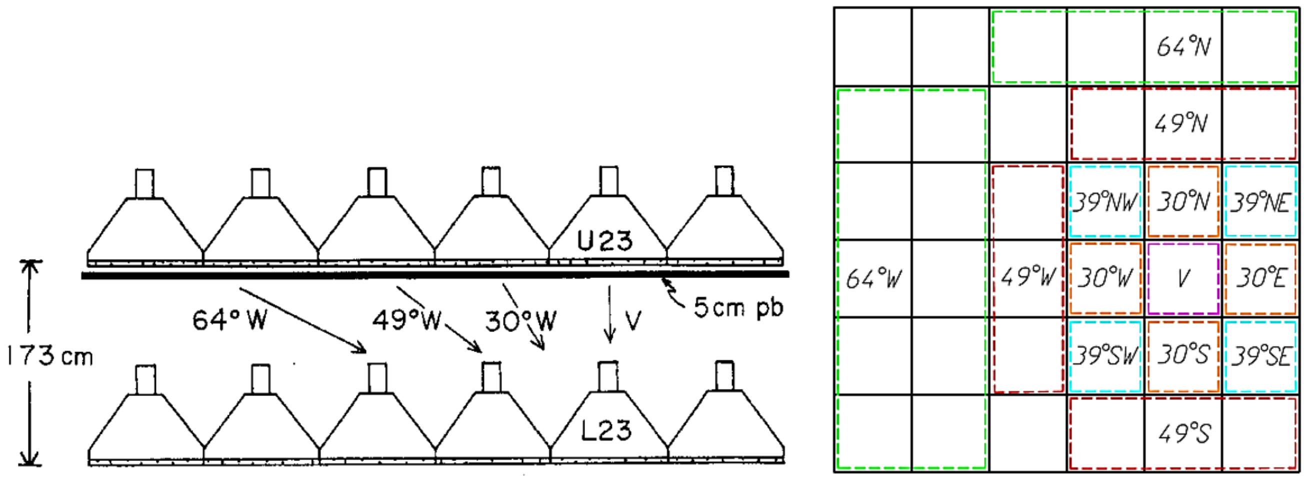


Рисунок 1.2. Схема формирования направлений регистрации частиц в многонаправленном телескопе Нагоя [72]

Каждая комбинация ячеек телескопа соответствует определенным диапазонам зенитных и азимутальных углов. На рисунке 1.3. представлены положения ячеек, которые формируются в многонаправленными мюонном телескопе в угловых координатах (вверху), и 3D-модель ячеек соответствующих угловых направлений (внизу).

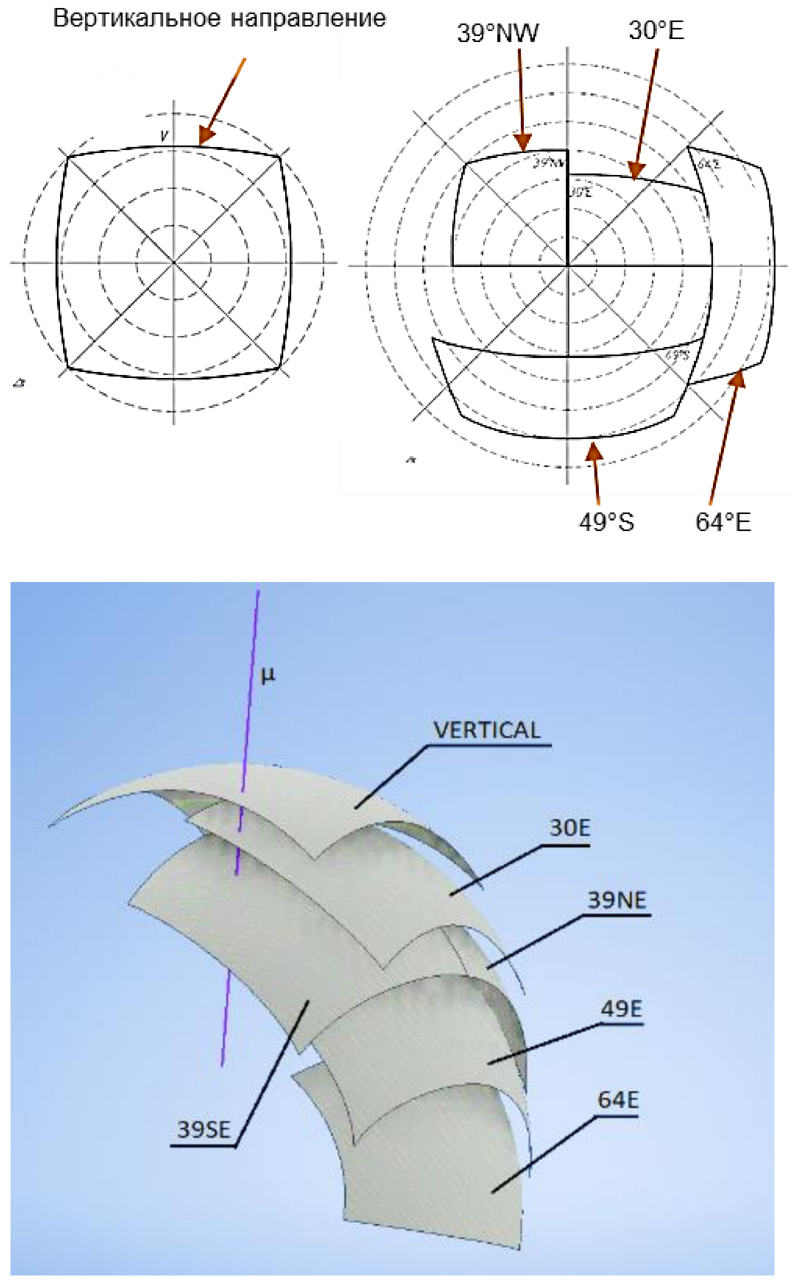


Рисунок 1.3. Угловые ячейки многонаправленного телескопе Нагоя

Из рисунка 1.3. видно, что ячейки перекрываются и существуют некоторые зенитные и азимутальные углы, при которых мюоны могут быть зарегистрированы в разных ячейках. Для примера на рисунке представлен околовертикальный трек мюона, который при прохождении через ММТ может быть записан в три различные ячейки. Таким образом, в данных многонаправленных мюонных годоскопов картина анизотропии искажается за счет усреднения по достаточно большому телесному углу апертуры каждого углового интервала.

В мюонных годоскопах в отличие от ММТ появляется возможность регистрации и восстановления в режиме реального времени направления трека каждого мюона, приходящего с любого направления небесной полусферы в пределах апертуры годоскопа. На рисунке 1.4. представлена схема построения мюонного годоскопа. На ней зеленым цветом отмечены сработавшие каналы в плоскостях. Угловая точность мюонного годоскопа обычно составляет ~ 1°.

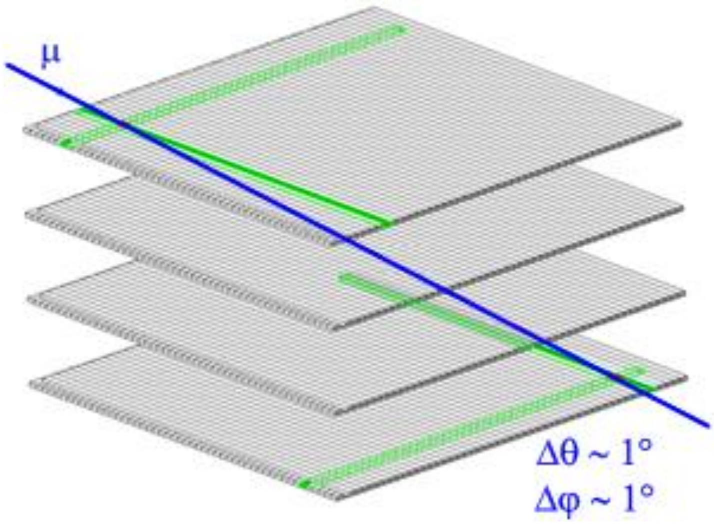


Рисунок 1.4. Схематичное представление мюонного годоскопа

Мюонные годоскопы позволяют разделять частицы по направлениям, а не изучать суммарный поток, зарегистрированный в определенном телескопном углу, где суммируются частицы со всех направлений в границах этого телесного угла. Поэтому в данных мюонного годоскопа присутствует полная информация об особенностях и динамике анизотропии космических мюонов и, соответственно, анизотропии частиц первичных космических лучей.

1.2. Мюонный годоскоп УРАГАН

Широкоапертурный координатно-трековый детектор – мюонный годоскоп УРАГАН (55.7° N, 37.7° E, 173 м н. у. м.) [63, 64] – был создан в НИЯУ МИФИ в составе уникальной научной установки «Экспериментальный комплекс НЕВОД» в 2005 – 2007 гг. Мюонный годоскоп имеет модульную структуру и состоит из четырёх независимых идентичных супермодулей площадью ~11.5 кв. м каждый. На рисунке 1.5 представлена фотография общего вида установки. Три супермодуля СМ01, СМ03, СМ04 работают с 2007 года в режиме непрерывной экспозиции. Супермодуль СМ02 значительную часть времени работает в режиме стенда для тестирования и калибровки детекторов и установок различного типа [73].

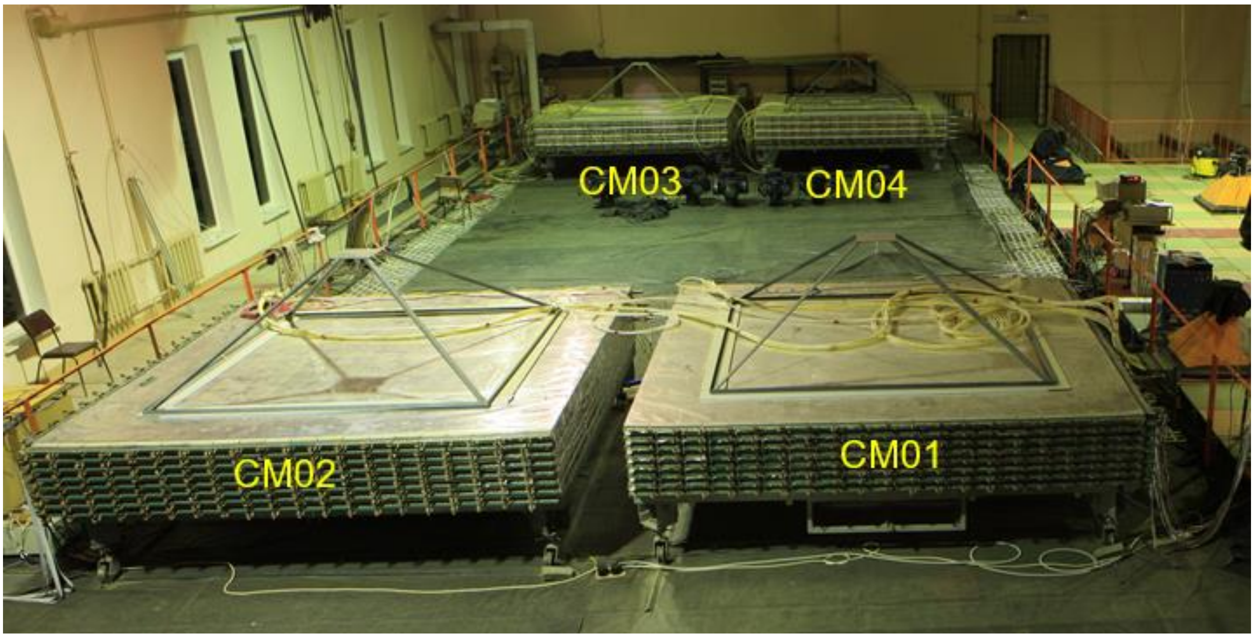


Рисунок 1.5. Фотография четырёх супермодулей мюонного годоскопа УРАГАН

Каждый супермодуль мюонного годоскопа состоит из восьми двухкоординатных плоскостей. Каждая плоскость представляет собой сборку из 20 камер, оснащённых двухкоординатной системой внешних считывающих стрипов-полосок (320 X-каналов и 288 Y-каналов с шагом 1.0 и 1.2 см соответственно). Каждая камера состоит из 16 газоразрядных трубок с внутренним поперечным сечением 9×9 кв. мм и длиной 3.5 м, внутренняя сторона которых (катод) имеет высокоомное резистивное графитовое покрытие. Камеры работают в режиме ограниченного стримера, который обеспечивается специально подобранной трёхкомпонентной газовой смесью (аргон + CO_2 + n-пентан) и выбором соответствующего рабочего напряжения. Плоскости разнесены на расстояние 5 см друг от друга и разделены слоями пенопласта, обёрнутыми тонкой алюминиевой фольгой (0.05 мм) для уменьшения уровня электромагнитных наводок. Супермодули обеспечивают высокую пространственную (~ 1 см) и угловую (~ 1°) точность регистрации частиц космических лучей в широком диапазоне зенитных углов от 0° до 80°. На рисунке 1.6 показана схема супермодуля мюонного годоскопа УРАГАН.

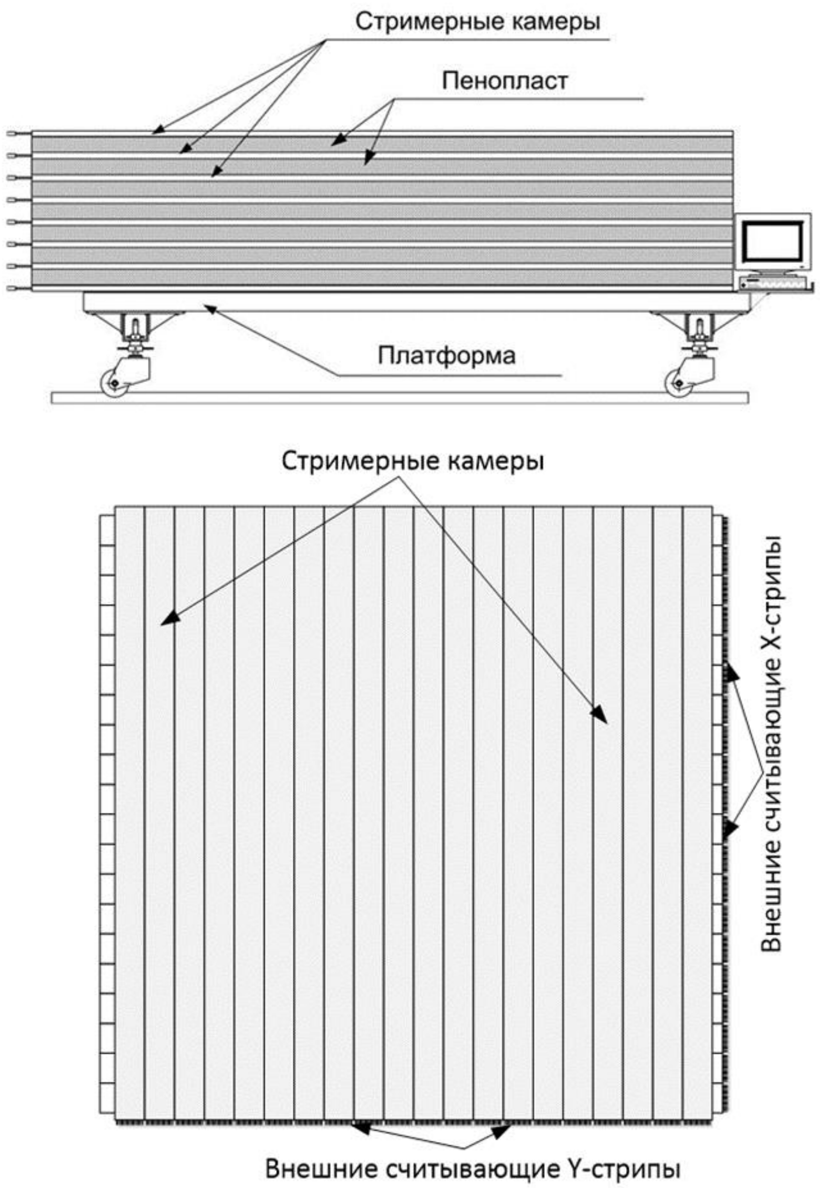


Рисунок 1.6. Схема супермодуля мюонного годоскопа УРАГАН, сверху – вид сбоку, снизу – вид сверху

При прохождении заряженной частицы через внутренний объем трубки формируется локальный электрический разряд – стример, который индуцирует электрический импульс на внешних стрипах считывающей системы мюонного годоскопа.

Система формирования триггера и сбора данных годоскопа имеет распределенную модульную многоуровневую архитектуру, что позволяет менять конфигурацию и наращивать систему при развертывании дополнительных супермодулей детектора. Общая синхронизация по мировому календарному времени (UT) обеспечивается с помощью блоков GLONASS/GPS. Условием выработки триггерного сигнала супермодуля является совпадение не менее четырёх сигналов с *X*-стрипов в течение 250 нс, что с 99% эффективностью идентифицирует прохождение заряженной частицы через восьмислойный супермодуль годоскопа [63, 74]. Скорость счета реконструированных треков составляет ~1300 – 1500 $с^{-1}$.

Энергетический порог регистрации мюонов зависит от зенитного угла и варьируется от 200 до 400 МэВ в зависимости от толщины вещества стен и крыши, которые окружают разные супермодули [75].

Сбор данных супермодуля осуществляется периферийным компьютером с помощью специально разработанного программного обеспечения, к которому непосредственно подключена электроника супермодуля. Синхронизация работы всех периферийных компьютеров с помощью систем GLONASS/GPS обеспечивается программой управления на центральном компьютере. Компьютеры объединены специальной сетью LAN и подключены к общей локальной вычислительной сети экспериментального комплекса НЕВОД. В центральном компьютере также записываются данные датчиков атмосферного давления и температуры в помещении установки. На рисунке 1.7 показана схема соединения компьютеров установки УРАГАН.

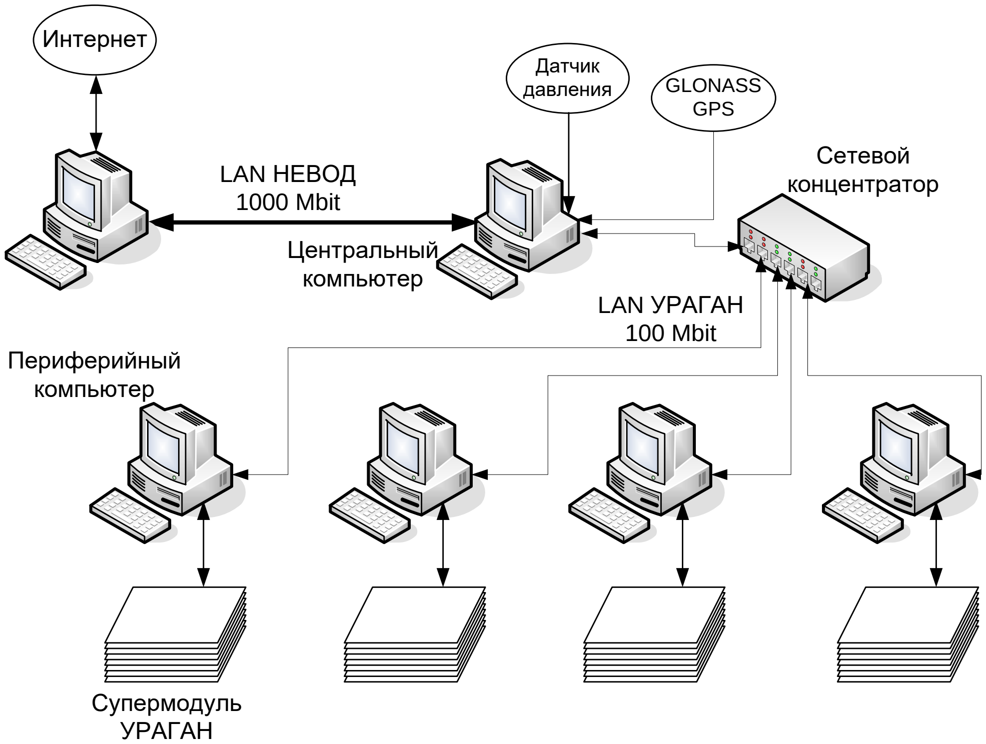


Рисунок 1.7. Схема компьютерной сети мюонного годоскопа УРАГАН

1.3. Экспериментальные данные МГ УРАГАН

Отклик супермодуля представляет собой информацию о сработавших стрипах в каждой из двух проекций *X* и *Y* координатных плоскостей сборок камер дрейфовых трубок. Примеры отклика мюонного годоскопа представлены на рисунке 1.8. По этим данным параметры треков реконструируются в режиме реального времени с помощью программного обеспечения, основанного на методе гистрограммирования. Возможно сохранять информацию обо всех зарегистрированных мюонах, однако это требует очень большого объема памяти (~ Петабайт на каждый год работы установки). Вследствие этого было принято решение хранить данные в виде четырех угловых матриц с минимальными угловыми ячейками. Каждая ячейка содержит количество треков мюонов, пришедших в определенных угловых интервалах за время экспозиции кадра в течение 1 минуты. Кроме того, каждую минуту производится набор контрольных данных, которые включают:

– дату и время начала и завершения минутного интервала в UTC;
– количество триггеров за время набора кадра;
– количество событий с реконструированным треком;
– количество событий с реконструированным треком внутри рабочего объёма;
– живое время регистрации в микросекундах;
– информацию о мониторинге каналов регистрации и передачи данных;
– данные датчиков атмосферного давления и температуры в помещении.

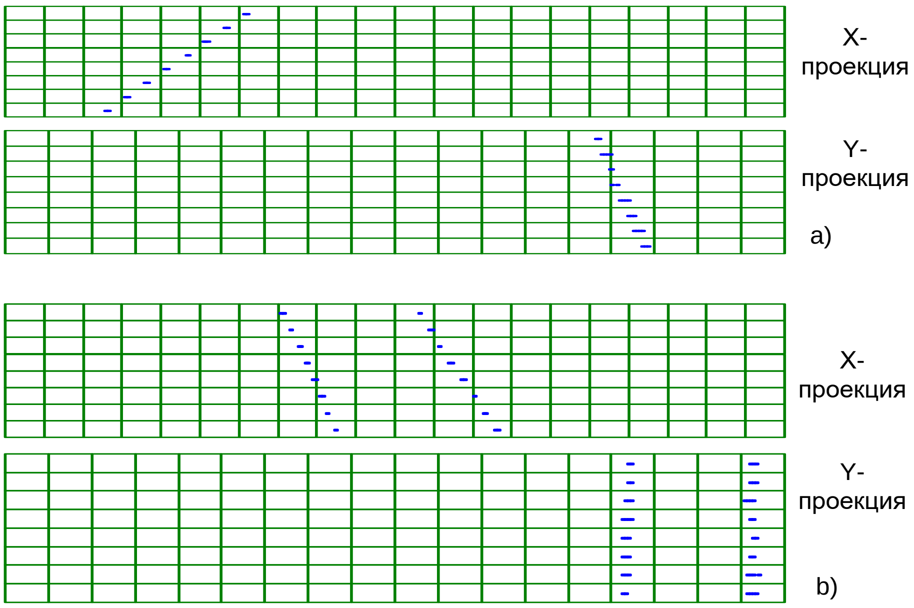


Рисунок 1.8. Примеры отклика УРАУГАН: одиночного (а) и двухчастичных (б) событий

Данные одноминутной экспозиции записываются в четыре угловые матрицы:

1) $M_{a\_0} \equiv M[\theta, \varphi]$ – матрица с разбиением по зенитному (θ) и азимутальному (φ) углам для всех зарегистрированных треков с размерами ячейки $\Delta\theta = 1°$, $\Delta\varphi = 4°$, $\theta \in [0, 90]°$, $\varphi \in [0, 360)°$;

2) M_a – матрица, аналогичная M_{a_0}, но для треков, прошедших все восемь плоскостей рабочего объема супермодуля – «bound» треки;

3) $M_{pa} \equiv [\theta_x, \theta_y]$ – матрица с равномерным разбиением по проекционным углам с размерами ячейки $\Delta\theta_x = 1°, \Delta\theta_y = 1°$, $\theta_x \in [0, 90]°$, $\theta_y \in [0, 90]°$ (только для случая «bound»);

4) $M_{tg} \equiv [\mathrm{tg}\theta_x, \mathrm{tg}\theta_y]$ – матрица, ячейки которой соответствуют диапазонам тангенсов проекционных углов – ячейки $\Delta\mathrm{tg}\theta_{xy} = \mathrm{tg}80°/45.5 = 0.12464$, $\theta_{xy} \in [0, 80]°$, (только для «bound» треков).

Матрица угловых распределений формируется следующим образом: с помощью программы реконструкции и первичного анализа отбираются только одночастичные события. Для каждого зарегистрированного события определяются параметры трека и в локальной системе координат супермодуля находятся проекционные углы (θ_X, θ_Y) и координаты точек пересечения реконструированным треком верхней и нижней плоскостей СМ (рисунок 1.9, слева). Эти координаты используются для проверки выполнимости условия «трек внутри рабочего объёма» – пересечения реконструированным треком не менее 8-ми плоскостей в регистрирующей зоне СМ. Перевод проекционных углов в пространственные (зенитный и азимутальный) углы осуществляется с учетом данных геометрической ориентации супермодулей. Размеры всех типов матриц одинаковые: 91 x 91 ячеек. На рисунке 1.9 справа показано соотношение системы координат супермодулей с лабораторной системой координат.

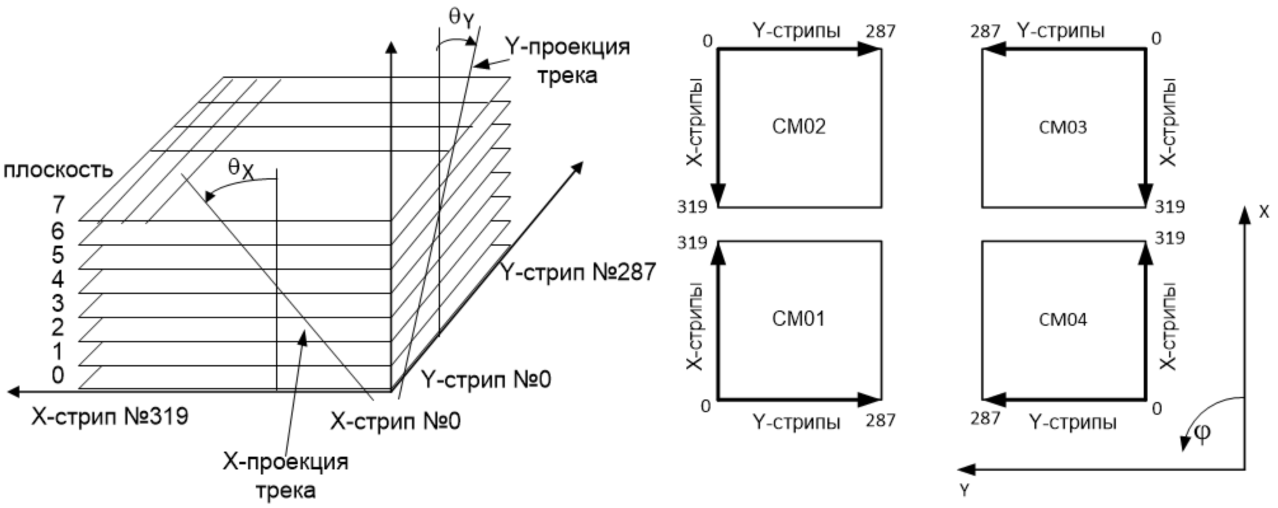


Рисунок 1.9. Слева – локальная система координат супермодуля УРАГАН, X- и Y-проекции реконструированного трека и его проекционные углы θ_X и θ_Y. Справа – относительное расположение и ориентация супермодулей (вид сверху)

Формирование матриц с различным разбиением ячеек обусловлено тем, что для последующего анализа используется информация об угловом распределении в различных видах для «bound» треков. На рисунках 1.10 – 1.12 представлены форматы угловых матриц. Статистическая обеспеченность таких матриц составляет около 5 миллионов треков за один час экспозиции.

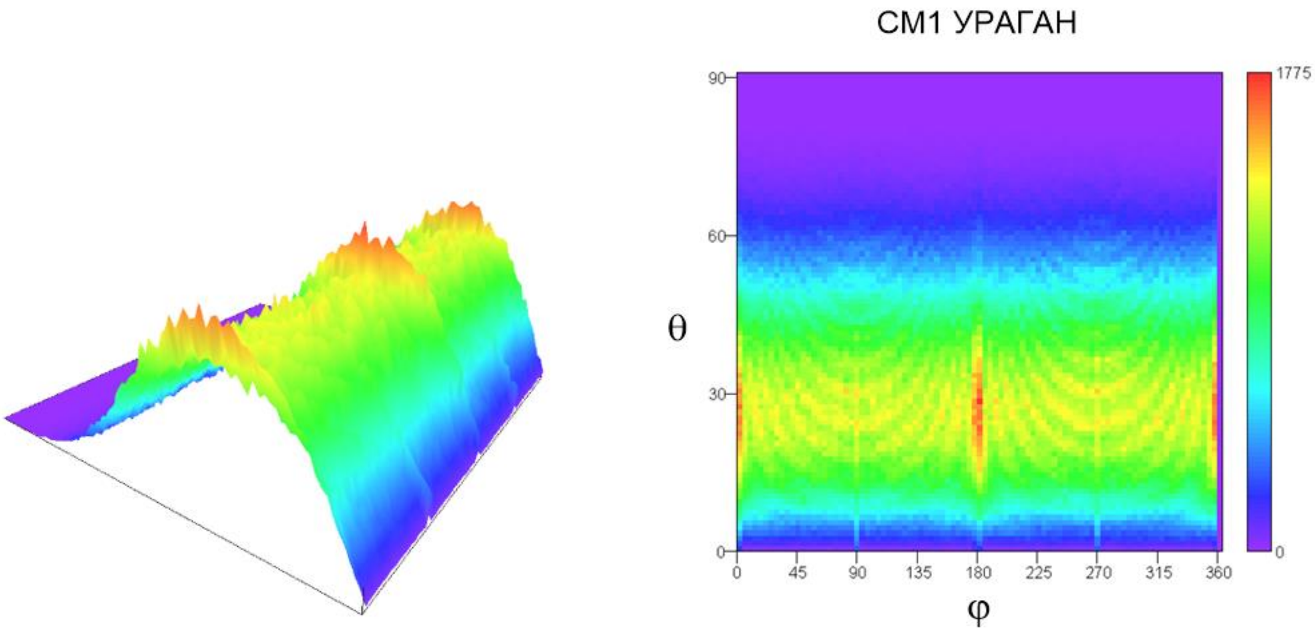


Рисунок 1.10. Вид стандартной матрицы кадра M_a в трехмерном и двухмерном формате. Цветовая шкала обозначает количество событий в ячейке

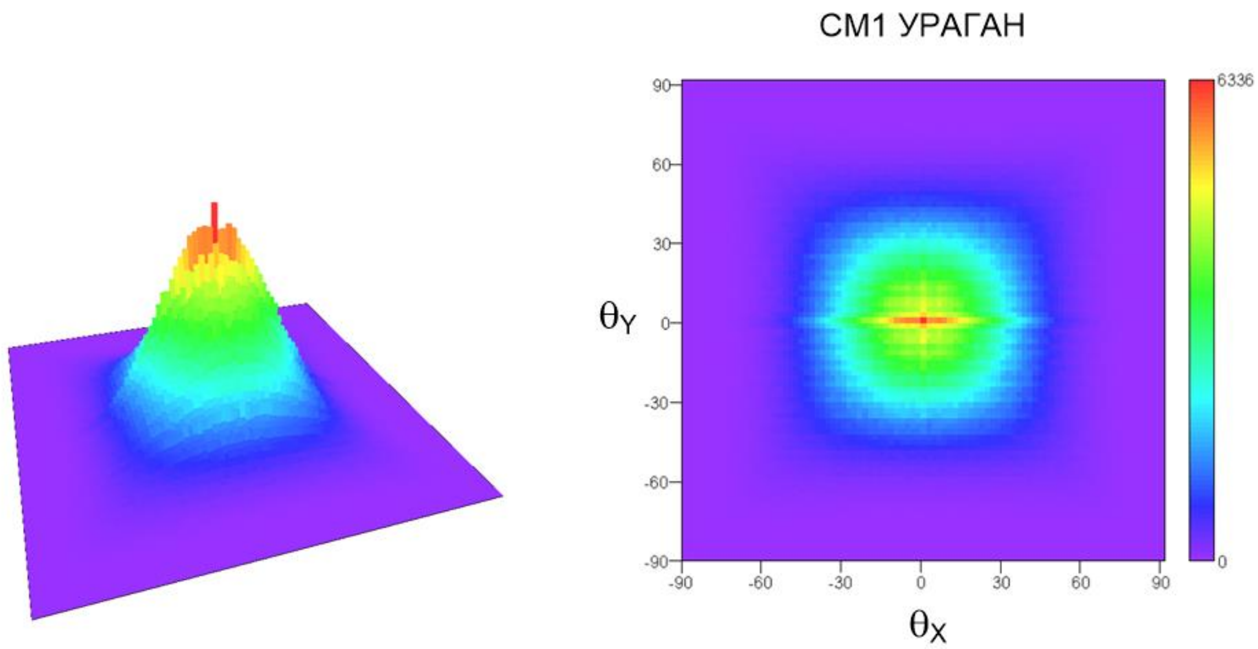


Рисунок 1.11. Вид стандартной матрицы проекционных углов M_{pa} в трехмерном и двухмерном формате. Цветовая шкала обозначает количество событий в ячейке

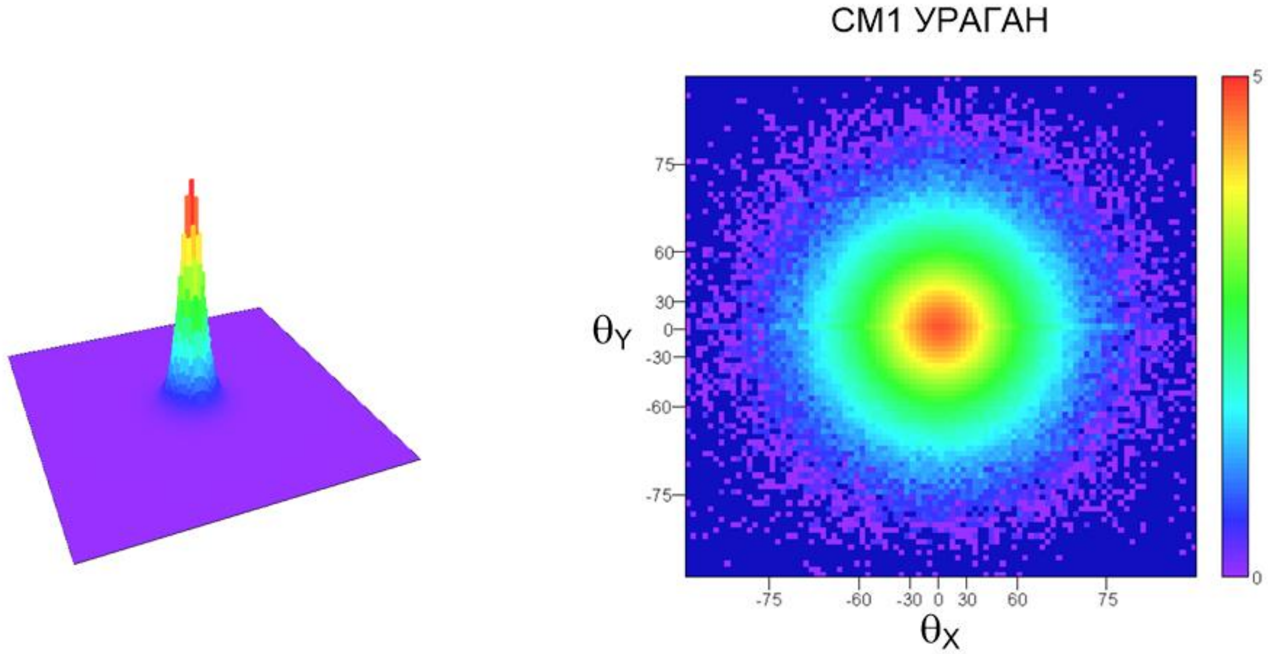


Рисунок 1.12. Вид матрицы тангенсов проекционных углов M_{tg} в трехмерном и двухмерном формате. Цветовая шкала по десятичному логарифму от количества событий в ячейке

Для увеличения статистической точности данные по ячейкам разных супермодулей могут объединиться. Также осуществляется последовательное покадровое суммирование матриц (одноминутных) за некоторые интервалы времени. Для исследования вариаций, связанных с возмущениями межпланетного магнитного поля, обычно используются данные, полученные в течение одного часа, а для исследования динамики атмосферных процессов используют данные за пятиминутные интервалы времени.

1.4. Учет атмосферных эффектов

Изменения атмосферных условий модулируют мюонный поток на поверхности Земли, а вариации внеатмосферного происхождения имеют тот же порядок величин. Поэтому для изучения внеатмосферных эффектов необходимо сначала скорректировать все матрицы на атмосферные эффекты, используя соотношение:

$$M^{cor} = M + \Delta M^{P} + \Delta M^{T}, \tag{1.1}$$

где ΔM^{T} и ΔM^{P} – матрицы поправок на температурный и барометрический эффекты соответственно [76, 77].

Барометрические коэффициенты B определяются для каждой ячейки всех трех типов матриц. В результате формируются три матрицы поправок на барометрический эффект: B_a, B_{pa}, B_{tg}. Матрица барометрических поправок $\left(\Delta M_m^P\right)_i^l$ матрицы M_m для *i*-го кадра и *l*-го СМ рассчитывается по формуле:

$$\left(\Delta M_m^P\right)_i^l = B_{m\_l}(P_0 - P_i)\left(t_{Live}^l\right)_i, \tag{1.2}$$

где m – тип матрицы (соответственно, *a, pa, tg*), P_0 – среднее давление за длительный период времени (~993 мбар); P_i – среднее значение давления в течение интервала «живого» времени $\left(t_{live}^l\right)_i^l$, B_{m_l} – матрица барометрических коэффициентов [$с^{-1}$ $мбар^{-1}$] для *l*-го СМ.

Поправка на температурный эффект рассчитывается с учетом температурного профиля атмосферы [78, 79]. Для матрицы по зенитным и азимутальным углам она имеет вид:

$$\Delta M_a^T = M_a^0 \cdot \sum_k W^T(h_k,\theta)\Delta T(h_k)\Delta h / 100\%. \tag{1.3}$$

Здесь M_a^0 – среднее значение матрицы M_a, полученное за длительный период времени, $W^T(h_k,\theta)$ – разность температурных коэффициентов (%$атм^{-1}\cdot К^{-1}$) при зенитном углу θ и высоте h_k, h_k – глубина k-го слоя атмосферы, Δh =0.05 атм и $\Delta T(h_k) = T_{SMA}(h_k) - T(h_k)$, где $T(h_k)$ – температура на глубине h_k, а $T_{SMA}(h_k)$ – температура стандартной модели атмосферы на той же глубине [80].

На рисунке 1.13 представлены часовые данные скорости счета в период с 2007 по 2020 гг. Черной линией указана скорость счета без введения поправок, синей линией – с учетом барометрического эффекта, красной – с учетом барометрического и температурного эффекта. Барометрические коэффициенты мюонного годоскопа УРАГАН не зависят от зенитного угла и составляют около ~ 0.18 %/мбар. После поправки на барометрический эффект хорошо видны годовые вариации, вызванные температурным эффектом (~ 12.5 %). После введения поправки на влияние температуры сезонные вариации исключаются, выделяются вариации, вызванные внеатмосферными процессами.

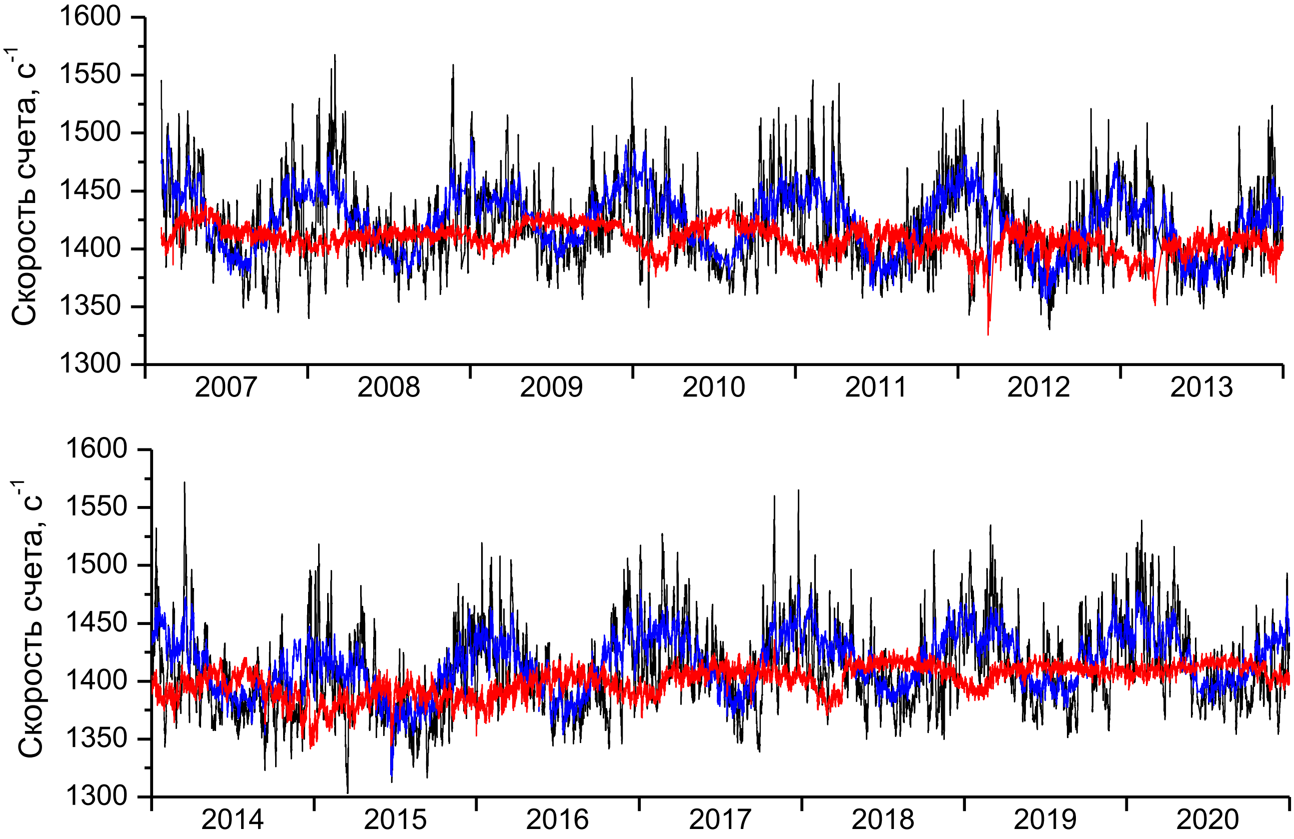


Рисунок 1.13. Скорость счета мюонов за 2007 – 2020 гг.

Черная кривая – без введения поправок, синяя кривая – с учетом барометрического эффекта, красная кривая – с учетом температурного эффекта

1.5. Локальная анизотропия потока мюонов

Мюонные годоскопы в отличие от мюонных телескопов позволяют восстанавливать траектории всех мюонов, приходящих с различных направлений небесной полусферы в пределах апертуры, и на их основе строить угловые матрицы, которые, в свою очередь, дают возможность изучать пространственно-угловую динамику изменений потока частиц и получать информацию об анизотропии космических лучей.

Для количественного описания регистрируемой анизотропии потока мюонов космических лучей используется вектор локальной анизотропии $\vec{A}$, который указывает среднее направление прихода мюонов за определенный промежуток времени. Для расчета вектора локальной анизотропии используется матрица M_a. Проекции вектора A и его длина в локальной системе координат вычисляются по формулам [81]:

$$A_X = \frac{1}{N}\sum_{\theta}\sum_{\varphi} M_a \cos\varphi \sin\theta,$$
$$A_Y = \frac{1}{N}\sum_{\theta}\sum_{\varphi} M_a \sin\varphi \cos\theta, \tag{1.4}$$

$$
\begin{aligned}
&A_S = A_X \cos\varphi_0 + A_Y \sin\varphi_0, \\
&A_E = -A_X \sin\varphi_0 + A_Y \cos\varphi_0, \\
&A_Z = \frac{1}{N^{cor}} \sum_{\theta}\sum_{\varphi} M_a^{cor} \cos\theta, \\
&N = \sum_{\theta}\sum_{\varphi} M_a, N_{cor} = \sum_{\theta}\sum_{\varphi} M_a^{cor} \\
&A = \sqrt{A_S^2 + A_E^2 + A_Z^2},
\end{aligned}
\qquad (1.5)
$$

где A_X и A_Y – проекции в лабораторной системе координат; A_S – проекция на ось юг-север; A_E – проекция на ось восток-запад; A_Z – вертикальная проекция; θ, φ – зенитный и азимутальный углы для центра матрицы M_a; M_a^{cor} – матрица M_a с корректировкой на атмосферное давление; N – полное число событий в исследуемом диапазоне углов (θ = 0…75º, φ = 0…360º); N^{cor} – число N с коррекцией на атмосферное давление, которая необходима для расчета проекции A_Z; φ_0 – азимутальный угол между лабораторной системой координат и географической системой координат (в месте размещения УРАГАН в экспериментальном комплексе НЕВОД угол $\varphi_0 = 34.726°$, см. рисунок 1.14). Для A_S и A_E коррекцию на атмосферные эффекты вводить не требуется, поскольку изменения из-за метеоэффектов в основном зависят от зенитного угла (от азимутального угла значительно меньше), поэтому при суммировании для углов *φ* они входят с разными знаками, вследствие чего при полном суммировании в среднем поправки для данных проекций имеют околонулевые значения.

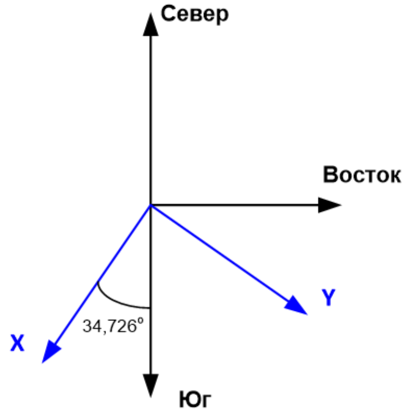


Рисунок 1.14. Взаимное расположение локальной системы координат относительно географической

Параметры локальной анизотропии вычисляются в режиме реального времени и выводятся на страницах http://nevod.mephi.ru/English/atmosphere.php (пятиминутные данные) и http://nevod.mephi.ru/English/heliosphere.php (часовые данные) сайта экспериментального комплекса НЕВОД. На рисунке 1.15 представлены примеры пятиминутных и часовых временных рядов.

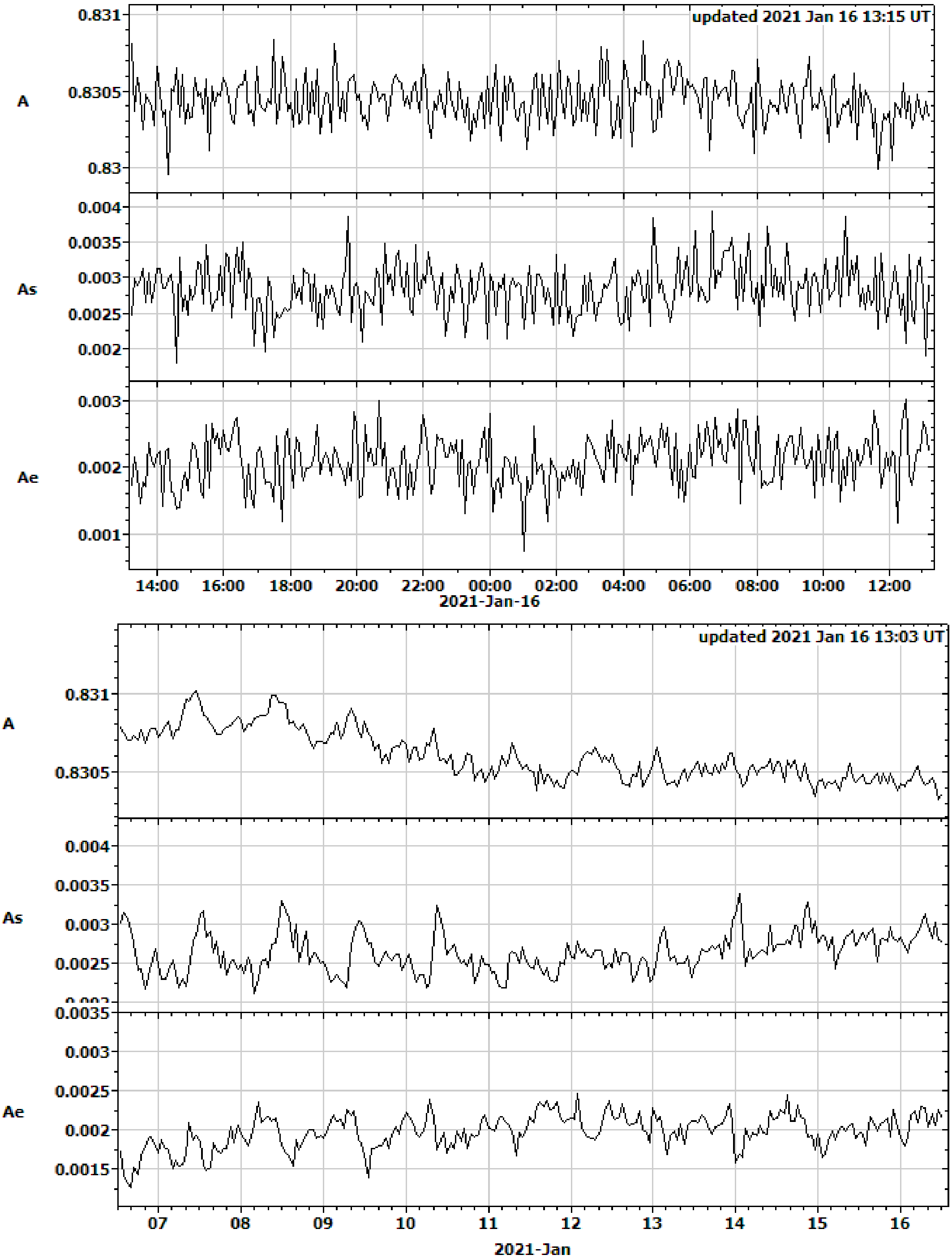


Рисунок 1.15. Пятиминутные (вверху) и часовые (внизу) данные изменения поведения длины вектора локальной анизотропии $\vec{A}$ и его проекций A_E и A_S

Важную информацию об изменениях локальной анизотропии космических лучей дает вектор относительной анизотропии, который представляет собой разность между текущим вектором анизотропии и его средним значением [81]:

$$\vec{r} = \vec{A} - \langle \vec{A} \rangle \tag{1.6}$$

Для исследования «бокового» воздействия на поток мюонов используется проекция вектора относительной анизотропии на горизонтальную плоскость, которая вычисляется по формуле:

$$r_h = \sqrt{r_S^2 + r_E^2} \qquad (1.7)$$

На рисунке 1.16 представлена схема расположения векторов в пространстве. Вектор $\vec{r}$ и его проекции r_h показывают, в каком направлении и какого уровня произошла деформация углового распределения потока частиц.

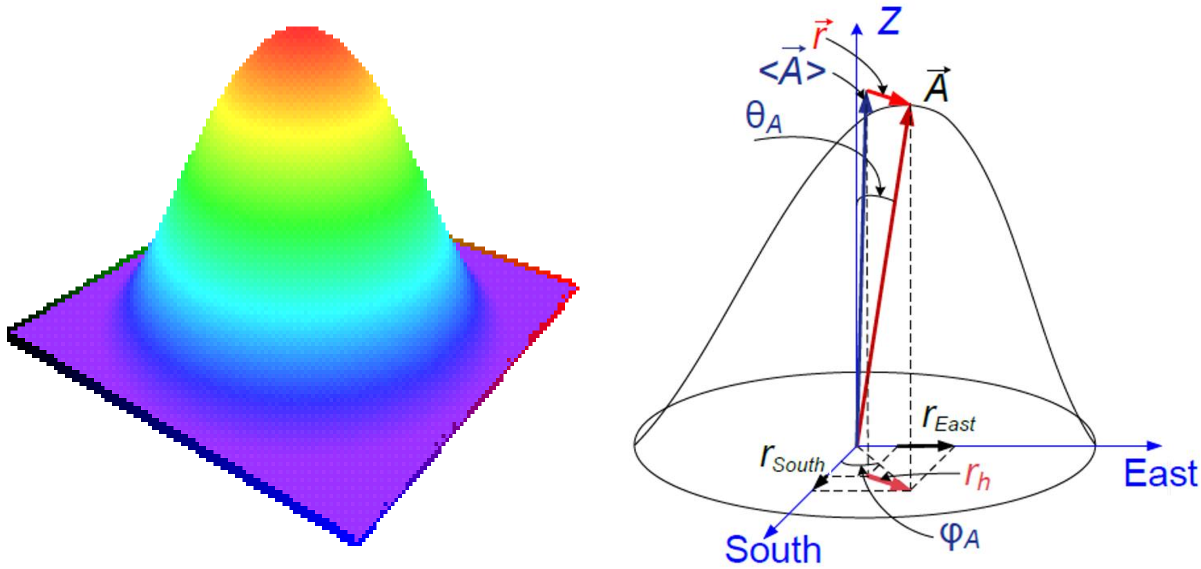


Рисунок 1.16. Представление матрицы проекционных углов M_{pa} в трехмерном пространстве (слева) и взаимное расположение вектора локальной анизотропии $\vec{A}$ и его проекций (справа)

Вектор $\vec{r}$ и его проекции r_h вычисляются в режиме реального времени и выводятся на страницах http://nevod.mephi.ru/English/atmosphere.php (пятиминутные данные) и http://nevod.mephi.ru/English/heliosphere.php (часовые данные) сайта экспериментального комплекса НЕВОД. На рисунке 1.17 представлены примеры пятиминутных и часовых временных рядов длины вектора $\vec{r}$ и его проекции r_h.

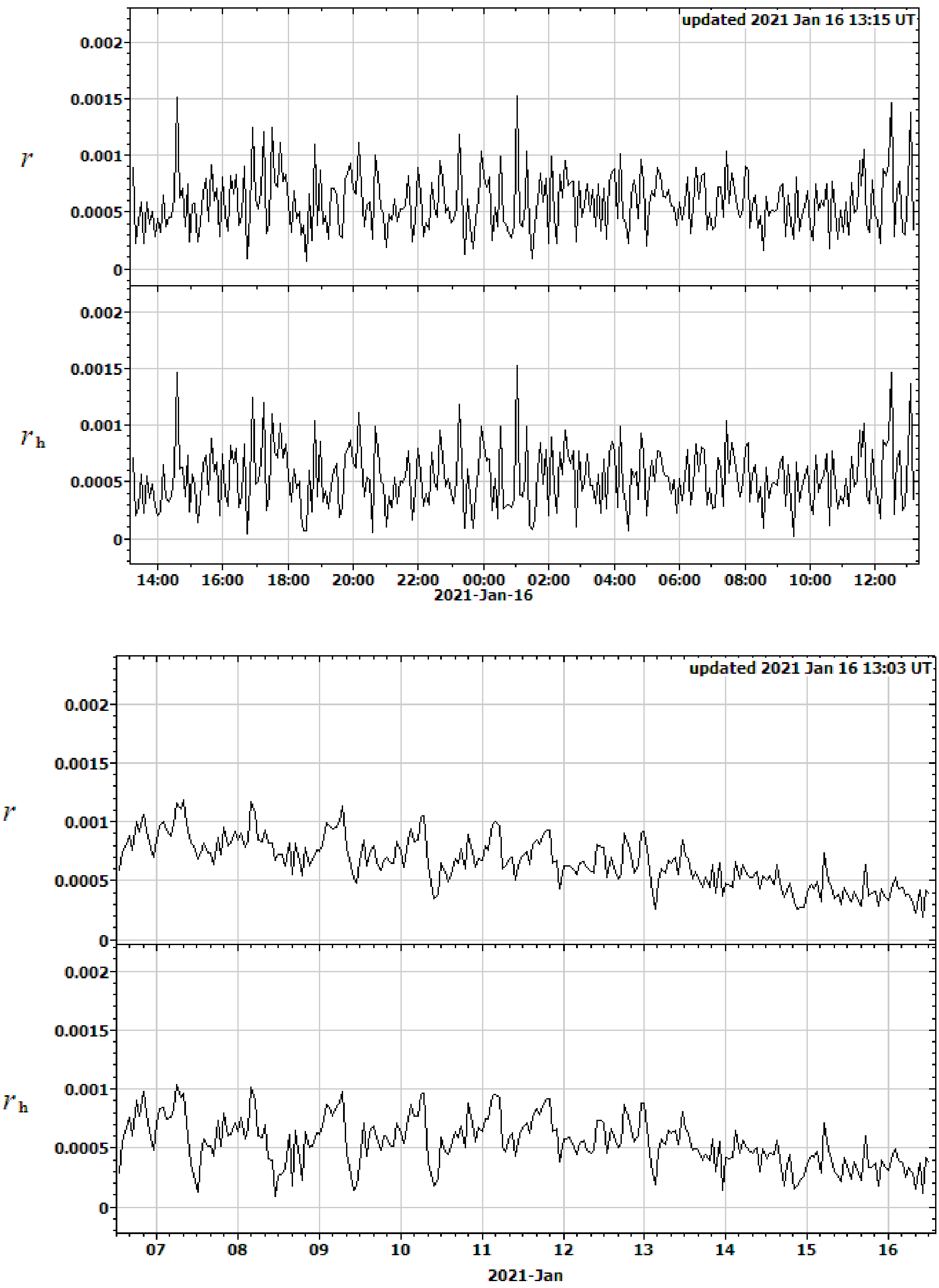


Рисунок 1.17. Примеры пятиминутных (сверху) и часовых (снизу) временных рядов длины вектора относительной анизотропии $\vec{r}$ и его проекции r_h

1.6. Мюонографии

Для изучения изменений углового распределения мюонов во время возмущений атмосферного и внеатмосферного происхождения наиболее удобно использовать тангенциальные матрицы проекционных углов, полученные относительно средних суточных измерений, в единицах статистических погрешностей. На рисунке 1.18 представлена схема формирования мюонографий [82]. На первом этапе мюонная матрица (рисунок 1.18 (а)) нормируется на среднюю матрицу, которая получается усреднением минутных матриц за последние сутки (рисунок 1.18 (б)). В результате формируется матрица (рисунок 1.18 (в)), у которой в каждой ячейке содержатся значения отклонения от среднего, выраженные в единицах среднеквадратичных отклонений. Для сглаживания резких флуктуационных выбросов в отдельных ячейках используется гауссовский фильтр низких частот (рисунок 1.18 (г)). С целью оптимизации представления информации и с учетом того, что в углах матрицы статистика мала, матрица представляется в виде круга, ограниченного зенитным углом 75° (рисунок 1.18 (д)).

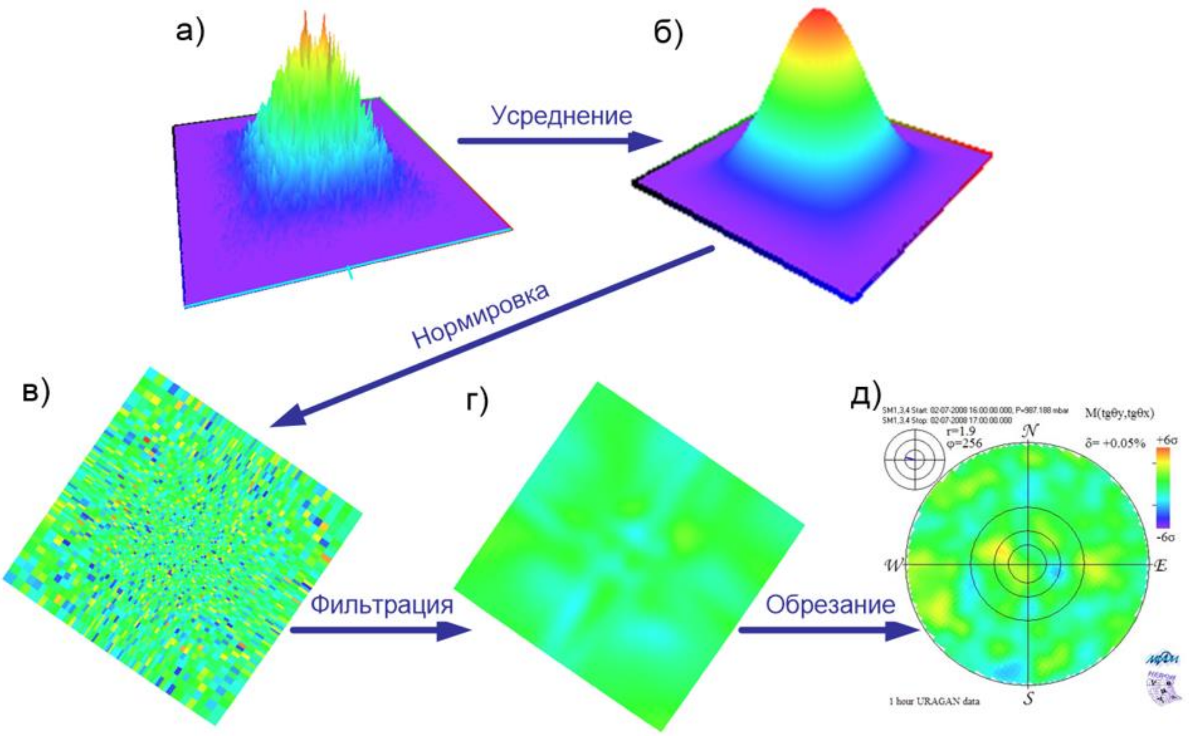


Рисунок 1.18. Схема формирования мюонографий: а) исходная матрица; б) матрица после усреднения; в) двухмерное изображение после нормировки; г) сглаженная угловая матрица; д) результирующая часовая мюонография в координатах tgθ_Y, tgθ_X [82]

Далее предоставлено более подробное описание процедуры формирования мюонографии.

После введения барометрических и температурных поправок (см. раздел 1.4) для всех угловых ячеек матрицы тангенсов вычисляется $M_{tg\_\Delta t}$ как сумма одноминутных матриц за пятиминутный или часовой интервал времени Δt (5 или 60 мин):

$$M_{tg\_\Delta t} = \sum_{\Delta t} M_{tg}\ ; \tag{1.8}$$

Определяются нормировочные матрицы M_{tg}^{N} как сумма минутных матриц за последние 24 часа:

$$M_{tg}^{N} = \sum_{24h} M_{tg}\ . \tag{1.9}$$

Суммарное живое время $t_{live\_\Delta t}$ СМ за соответствующий интервал времени Δt (5 или 60 мин) вычисляется по формуле:

$$t_{live\_\Delta t} = \sum_{\Delta t} t_{live}\ ; \tag{1.10}$$

Суммарное живое время t_{live}^{N} СМ за предыдущие 24 часа составляет:

$$t_{live}^{N} = \sum_{24h} t_{live}\ . \tag{1.11}$$

Мюонография (матрица в единицах статистических погрешностей M_{tg_δ}) вычисляется по формуле:

$$M_{tg\_\delta} = \frac{M_{tg\_\Delta t} - M_{tg}^{N} \dfrac{t_{live\_\Delta t}}{t_{live}^{N}}}{\sqrt{M_{tg}^{N} \dfrac{t_{live\_\Delta t}}{t_{live}^{N}}}}\ . \tag{1.12}$$

Мюонографии в онлайн-режиме [74] выводятся на сайт экспериментального комплекса НЕВОД на страницу представления данных мюонного годоскопа УРАГАН [83].

На рисунке 1.19 представлено сопоставление величины статистической погрешности (часовой) по трем СМ часовой матрицы M_{tg_δ} в зависимости от зенитного угла. Видно, что статистическая погрешность в процентах быстро увеличивается с ростом зенитного угла.

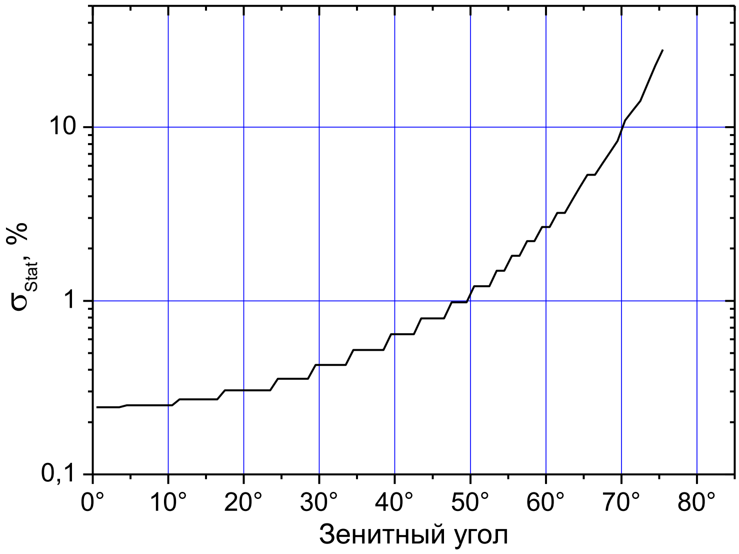


Рисунок 1.19. Зависимость статистической погрешности σ_{Stat} зенитного угла при часовой статистике в ячейках сводной по трем СМ матрицы $M_i(tg\theta_Y, tg\theta_X)$

Сглаживание флуктуационных выбросов в отдельных ячейках мюонографии осуществляется с помощью гауссовского фильтра низких частот с радиусом R_f. Вначале сглаживаются матрицы $M_{tg\_\Delta t}$ и M_{tg}^{N}:

$$\begin{aligned} &M_{tg\_i,j}^{sm} = k_{i,j} \sum_{l,m} f_{i,j}^{l,m} M_{tg\_l,m}, \\ &M_{tg\_i,j}^{N\_sm} = k_{i,j} \sum_{l,m} f_{i,j}^{l,m} M_{tg\_i,j}^{N}, \\ &Q_{i,j}^{N} = \left(k_{i,j}\right)^2 \sum_{l,m} \left(f_{i,j}^{l,m}\right)^2 M_{tg\_i,j}^{N}, \\ &k_{i,j} = \frac{1}{\sum_{l,m} f_{i,j}^{l,m}}, \end{aligned} \tag{1.13}$$

где $f_{i,j}^{l,m} = \exp\left(-\frac{(l-i)^2+(m-j)^2}{2R_f^2}\right)$ – сглаженная матрица с дисперсий; $R_f = 2$.

Сглаженная матрица относительных отклонений вычисляется аналогично формуле (1.12):

$$M_{tg\_\delta}^{sm} = \frac{M_{tg\_\Delta t}^{sm} - M_{tg}^{N\_sm} \frac{t_{live}}{t_{live}^{N}}}{\sqrt{Q^N \frac{t_{live}}{t_{live}^{N}}}} \tag{1.14}$$

На следующем этапе осуществляется коррекция формы углового распределения для выявления более детальной структуры мюонографий.

Распределение потока мюонов по зенитному углу θ приблизительно описывается следующими выражениями:

$$\begin{gathered}\frac{M_a}{t_{live}} = C(\cos\theta)^{\alpha} M_{d\Omega} \\ \frac{M^N}{t_{live}^N} = C^N\left((\cos\theta)^{\alpha}\right)^N M_{d\Omega}\end{gathered}, \qquad (1.15)$$

где M_a и M^N – матрицы углового распределения, записанные за интервал живого времени t_{live} и t_{live}^N соответственно; C и C^N – нормировочные коэффициенты [с$^{-1}$ср$^{-1}$], определяющие интенсивность потока мюонов; α и α^N – показатели степени косинуса, которые отражают энергетическое распределение мюонов и геометрический фактор детектора; $M_{d\Omega}$ – матрица, в каждой ячейке которой содержится телесный угол соответствующей ячейки матрицы M_a [ср].

Коэффициент $\varepsilon(\theta)$, учитывающий изменение формы углового распределения, вычисляется по следующей формуле:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{C(\cos\theta)^{\alpha}}{C^N\left((\cos\theta)^{\alpha}\right)^N}. \qquad (1.16)$$

Мюонография, скорректированная на изменение формы углового распределения, с учетом выражений (1.15) и (1.16) вычисляется аналогично формуле (1.14), при этом каждая ячейка матрицы умножается на значение коэффициента $\varepsilon(\theta)$, связанного с соответствующим углом ячейки:

$$M_{tg\_\delta}^{cor} = \frac{M_{tg}^{sm} - \varepsilon(\theta)\, M_{tg}^{N\_sm} \dfrac{t_{live}}{t_{live}^N}}{\sqrt{\varepsilon(\theta)\, Q^N \dfrac{t_{live}}{t_{live}^N}}}. \qquad (1.17)$$

На рисунке 1.20 представлен пример пятиминутных мюонографий. Из рисунка видно, что после коррекции на форму углового распределения в мюонографиях суточные вариации анизотропии исчезают, при этом остальные особенности мюонографии сохраняются.

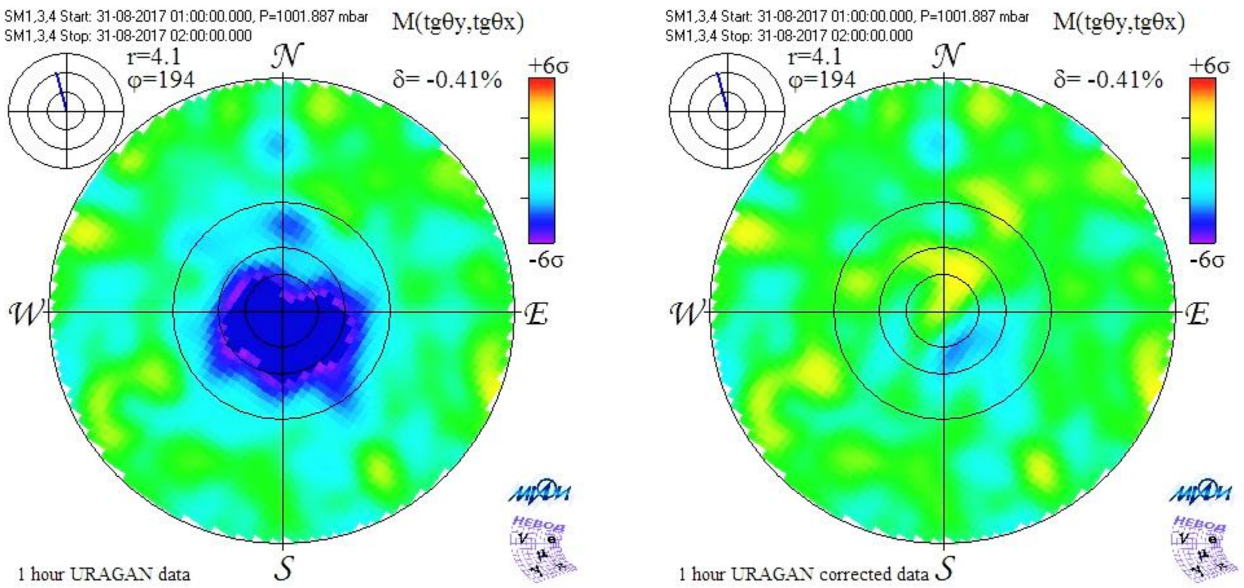


Рисунок 1.20. Мюонографии пятиминутной матрицы вариаций потока мюонов, нормированной и сглаженной (слева), а также скорректированной на форму углового распределения (справа)

На мюонографиях также отображается дополнительная информация [81]:

- тип матрицы и номера супермодулей, которые использовались для построения мюонографии;
- *Start/Stop* – начало и конец кадра;
- *P* – среднее атмосферное давление;
- δ – относительное изменение скорости счета (отношение средней скорости счета за интервал времени 5 мин или 1 час к средней интенсивности за предыдущие 24 часа);
- *r* – модульное значение горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии *r* в единицах статистической погрешности (r_h/σ_{rh}) и значение азимутального угла φ в градусах, показывающего отклонение вектора *r* (с юга на восток);
- круги в левом углу визуализируют текущее положение вектора $\vec{r}$ (радиус соответствует значению длины вектора $\vec{r}$, равной 2, 4 и 6 в единицах статистической погрешности;
- концентрированные окружности на мюонографии указывают ячейки мюонографии с зенитными углами 30º, 45º, 60º и 75º.

Для анализа атмосферных эффектов мюонографию удобно сопоставить с картой Московского региона. С этой целью для каждой ячейки матрицы $M^{cor}_{tg\_\delta}$ ищется зона пересечения телесного угла с плоскостью, расположенной на высоте 15 км над поверхностью Земли, т.е. на уровне генерации потока мюонов. Далее координаты найденных ячеек проецируются на карту региона. На рисунке 1.21 представлена пятиминутная мюонография, спроецированная на карту Московского региона. Центр мюонографии соответствует положению мюонного годоскопа. В онлайн-режиме такие мюонографии за последние 2 часа с текущего момента времени отображаются на сайте ЭК НЕВОД по адресу: http://nevod.mephi.ru/English/atmosphere.php. Набор таких мюонографий с шагом в пять минут позволяет проводить анализ динамики изменения потока мюонов космических лучей.

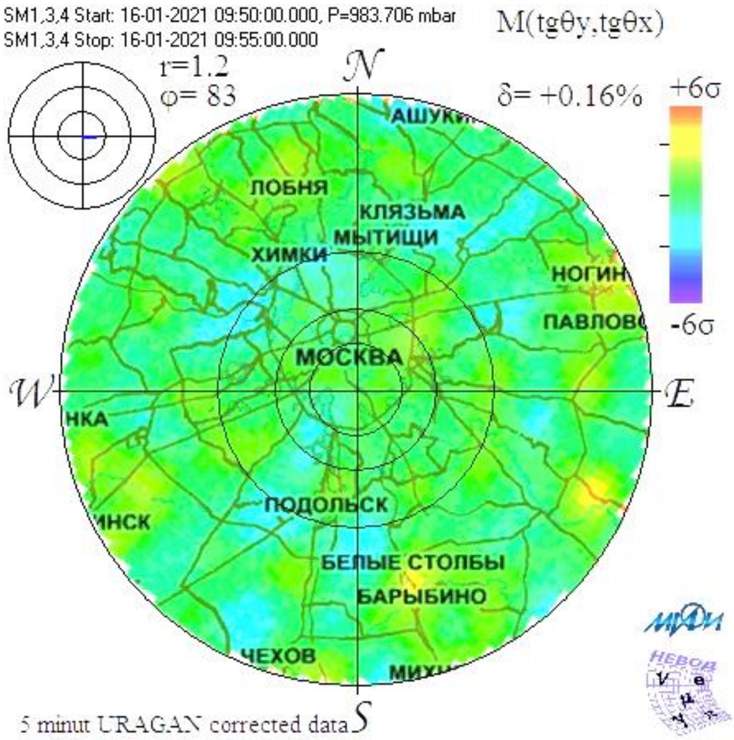


Рисунок 1.21. Мюонография пятиминутной матрицы, спроецированной на карту Московского региона

1.7. Мюонография в GSE-системе координат

Для наблюдения гелиосферных процессов с помощью углового распределения атмосферных мюонов необходимо перейти от направления мюонов в детекторе к направлениям первичных частиц на магнитопаузе и перенести интенсивность потока мюонов, полученную в угловых ячейках $(\theta, \varphi)_{лок}$ исходной матрицы углового распределения в локальной системе координат, в интенсивность потока протонов в угловых ячейках в системе GSE (Geocentric Solar Ecliptic) $(\theta, \varphi)_{GSE}$ на границе магнитопаузы. Так как система координат GSE связана с положением Земли относительно Солнца, положение детектора в этой системе координат будет зависеть от времени. Поэтому для получения соответствия между ячейками $(\theta, \varphi)_{лок}$ и $(\theta, \varphi)_{GSE}$ необходимо учитывать календарное время и проводить расчёт асимптотических направлений для каждого отдельного момента времени. При преобразовании учитывается тот факт, что положение детектора в системе координат GEO не является функцией времени, а асимптотические направления в системе координат GEO в течение суток существенно не изменяются. Только в моменты очень сильных магнитных бурь магнитное поле Земли может деформироваться настолько, что это приведёт к заметной суточной зависимости асимптотических направлений.

Поэтому сначала проводится предварительный расчёт асимптотических направлений в системе координат GEO, то есть устанавливается соответствие между $(\theta, \varphi)_{лок}$ и $(\theta, \varphi)_{GEO}$ (см. рисунок 1.22). Это делается с помощью программы построения асимптотических направлений. В качестве переменных используются направления мюонов в детекторе $(\theta, \varphi)_{лок}$ и энергии протонов в зоне генерации. Пороговая энергия мюонов в детекторе выбирается равной 0.3 ГэВ. Энергии протонов в зоне генерации могут быть выбраны различными: либо фиксированными, либо зависящими от зенитного угла эффективными энергиями. Результатом работы программы построения асимптотических направлений являются два набора, заключённые в одном бинарном файле: $\theta_{GEO}(\theta, \varphi)_{лок}$ и $\varphi_{GEO}(\theta, \varphi)_{лок}$. Угловые направления мюонов в детекторе рассчитываются в интервале зенитных углов, где $\theta_{лок} = 0^o \div 80^o$ с шагом 1^o, и в интервале азимутальных углов, где $\varphi_{лок} = 0^o \div 358^o$ с шагом 2^o.

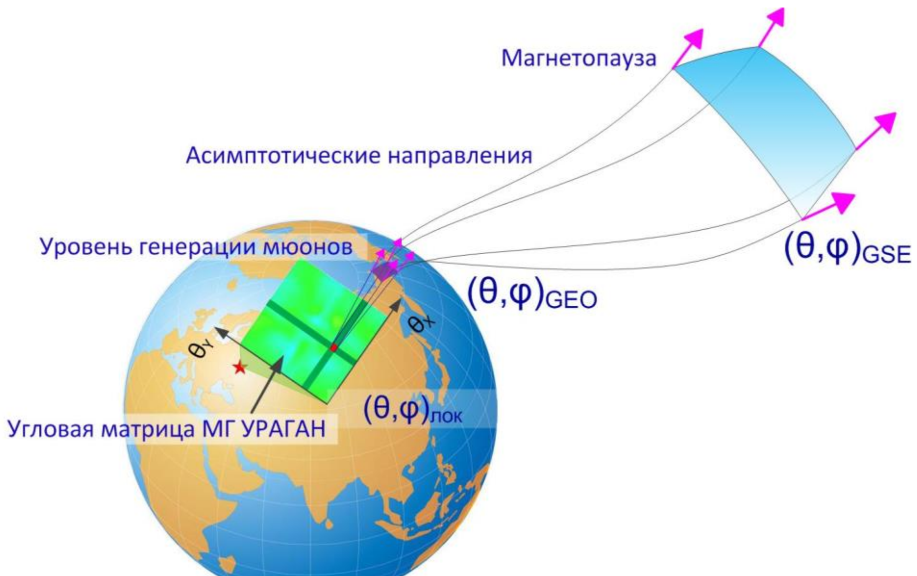


Рисунок 1.22. Соответствие между угловыми ячейками $(\theta, \varphi)_{лок}$ и $(\theta, \varphi)_{GEO}$

Предварительно рассчитываются асимптотические направления для разной геомагнитной обстановки, для разных календарных дней и времени суток, для различных энергий протонов в зависимости от требований проводимого впоследствии анализа. Следует отметить, что уже на этом этапе такие наборы направлений устанавливают соответствие между угловыми координатами в локальной системе координат и в системе GEO, однако это соответствие уже является нелинейным. Так как меняется и ориентация ячеек в угловых координатах, их форма в GEO уже не является прямоугольной (см. рисунки 1.22 и 1.23).

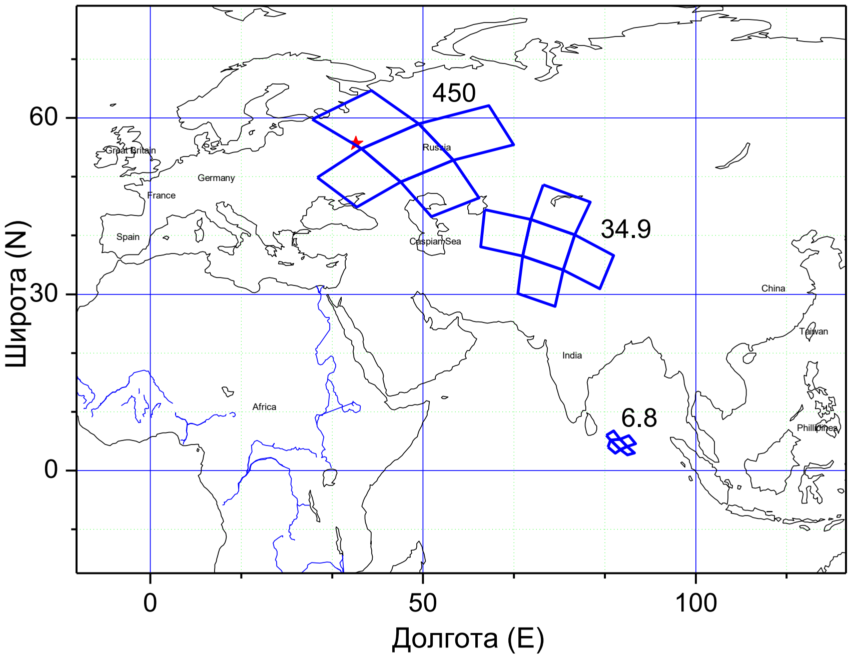


Рисунок 1.23. Асимптотические границы центральных ячеек матрицы проекционных тангенсов для протонов с энергиями 6.8, 34.9 и 450 ГэВ

При обработке экспериментальных данных преобразование угловой матрицы из локальной системы координат в систему координат GSE проводится по следующему алгоритму:

– на основе асимптотических направлений $\theta_{GEO}(\theta, \varphi)_{лок}$ и $\varphi_{GEO}(\theta, \varphi)_{лок}$ формируются данные по декартовым координатам $X_{GEO}(\theta, \varphi)_{лок}$, $Y_{GEO}(\theta, \varphi)_{лок}$ и $Z_{GEO}(\theta, \varphi)_{лок}$ единичных векторов асимптотических направлений;

– по тангенциальным матрицам определяются четыре угловые координаты текущей угловой ячейки $(\theta, \varphi)_{лок}$;

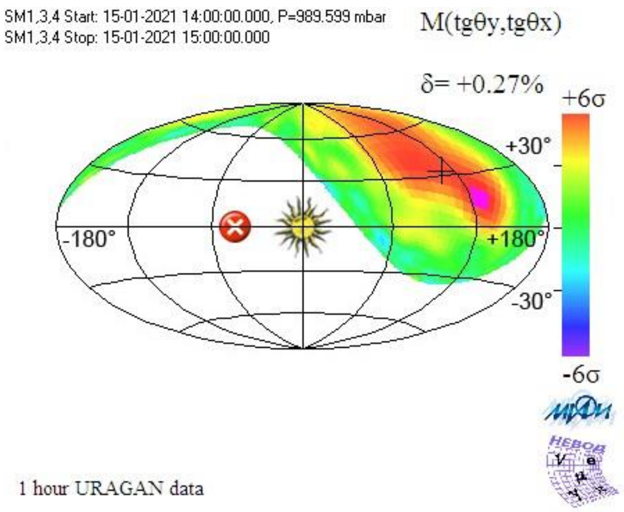
– для каждого направления в локальной системе $(\theta, \varphi)_{лок}$ с помощью данных единичных векторов асимптотических направлений вычисляются координаты единичных векторов $(X, Y, Z)_{GEO}$;

– с помощью библиотеки CXFORM [84] проводится преобразование векторов $(X, Y, Z)_{GEO}$ из системы GEO в систему GSE – $(X, Y, Z)_{GSE}$, по которым вычисляются угловые координаты $(\theta, \varphi)_{GSE}$;
– в результате для четырёх угловых координат $(\theta, \varphi)_{лок}$ каждой ячейки исходной локальной матрицы получаются четыре угловые координаты $(\theta, \varphi)_{GSE}$.

Таким образом, интенсивность потока каждой ячейки исходной матрицы из локальной системы детектора переводится в систему GSE в области ограниченной четырьмя координатами $(\theta, \varphi)_{GSE}$.

Описанный порядок получения матрицы асимптотических направлений в системе GSE не позволяет представить эту матрицу в виде двумерного массива, каковым является исходная матрица, из-за физической нелинейности трансформации направлений движения протонов на границе магнитопаузы в направления мюонов в детекторе.

На рисунке 1.24 показан пример 60-минутной мюонографии в GSE-системе, приведенной по адресу: http://nevod.mephi.ru/English/heliosphere.php. Динамическая последовательность часовых мюонографий за последние сутки с момента просмотра приводится по адресу: http://nevod.mephi.ru/English/sample3.php. Это позволяет проводить оценку динамики изменения анизотропии космических лучей, вызванной возмущениями в межпланетном пространстве.



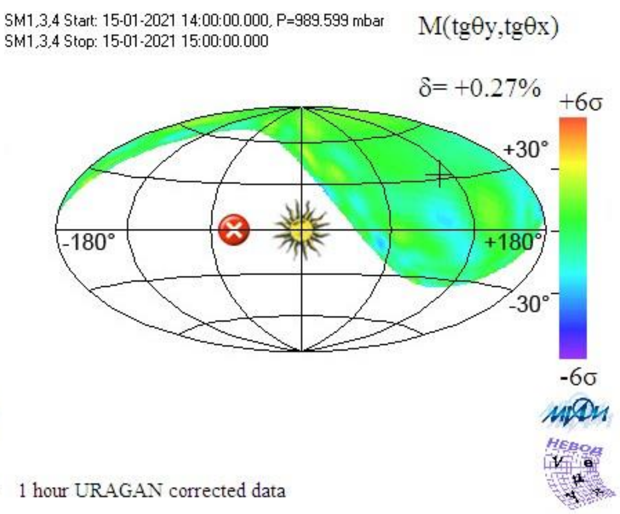


Рисунок 1.24. Мюонографии в GSE-системе без коррекции (левое изображение) и с коррекцией (правое изображение) на форму углового распределения. Обозначения на мюонографиях: δ – изменения скорости счета; крест – асимптотическое направление для мюонов, регистрируемых с вертикального направления; круг с косым крестом – направление силовой линии межпланетного магнитного поля; изображения Солнца – направление на Солнце

Такие мюонографии как в локальной системе координат, так и в системе GSE позволяют визуализировать вариации потока мюонов и их углового распределения во время различных активных процессов в атмосфере или гелиосфере, т.е. фактически наблюдать вызванную этими процессами анизотропию потока мюонов.

1.8. Основные результаты и выводы главы 1

Мюонография представляет собой снимок небесной полусферы в «мюонном» свете, выраженный в стандартных отклонениях зарегистрированной интенсивности потока мюонов в данной угловой ячейке от среднего значения за предыдущий период, величина которого определяется характером решаемой задачи.

Основное отличие мюонного годоскопа от многонаправленных телескопов заключается в способности измерять пространственно-угловые характеристики каждого зарегистрированного мюона, из которых впоследствии можно формировать любые угловые матрицы. Многонаправленный же мюонный телескоп регистрирует мюоны в угловых ячейках, определенных конструкцией телескопа, которые, как правило, перекрываются.

Для количественного описания мюонографий, которые дают хорошее визуальное изображение регистрируемых явлений, используется вектор локальной анизотропии $\vec{A}$, его проекции на оси локальной системы координат – A_x, A_y, A_z и проекции на оси юг-север A_S и восток-запад A_E, а также вектор относительной анизотропии $\vec{r} = \vec{A} - <\vec{A}>$ и его проекции r_S, r_E и r_h.

Мюонография в локальной системе координат может быть пересчитана в GSE систему с использованием асимптотических направлений первичных частиц, генерирующих мюоны, на границе магнитосферы. Такие мюонографии изменений потока первичных частиц позволяют наблюдать их анизотропию непосредственно в гелиосфере.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

2.1. Вариации потока мюонов космических лучей с 2007 по 2020 гг.

Исследования долговременных вариаций космических лучей начались фактически с момента их открытия, когда самые первые эксперименты показали, что изменения интенсивности потока космических лучей, регистрируемых на поверхности Земли, имеют регулярный характер и связаны с сезонными изменениями, вращением Земли, Солнца и циклом его активности. В 1939 году в работе [85] в рамках проведенных экспериментов наблюдались суточный, 27-дневный и годовой периоды в вариациях космических лучей. По мере накопления данных и увеличения длительности непрерывных экспериментов по регистрации космических лучей эти вариации анализировались и систематизировались [86]. Кроме исследования вариаций интенсивности космических лучей проводились и исследования вариаций анизотропии. Сначала под ними понимались амплитуда и фаза первой (24 ч) и второй (12 ч) гармоник по Фурье-анализу солнечно-суточных отклонений интенсивности, регистрируемых отдельными детекторами [87], а затем данные всемирной сети нейтронных мониторов [88, 89]. Мюонные годоскопы отрывают уникальные возможности анализа анизотропии потока мюонов КЛ. Подходы к анализу долговременных вариаций потока мюонов космических лучей с помощью метода мюонографии были разработаны при анализе данных за 2007 – 2011 гг. и представлены в работе [90]. Эти подходы были использованы и при анализе данных с 2007 по 2020 гг.

2.1.1. Анализируемые параметры относительной анизотропии

Для вычисления значений проекций A_S и A_E вектора локальной анизотропии при обработке данных используются исходные матрицы M_a без дополнительных барометрических и температурных поправок. Эти поправки в числителях формулы (1.14) для A_S и A_E уничтожаются при сложении значений с противоположных азимутальных углов, а использование поправок в суммарной величине (N) практически не влияет на результат. При вычислении A_Z используются значения матрицы M (θ, φ) с барометрическими поправками. Введение поправок на температурный эффект с помощью дифференциальных коэффициентов представлено в работах [76, 77].

Для анализа долговременных вариаций углового распределения были использованы часовые матрицы трех супермодулей, входящих в состав годоскопа

УРАГАН. Вектор локальной анизотропии вычислялся в диапазоне зенитных углов 25°≤ θ < 76°, так как данные в этом интервале более устойчивы в отличие от данных, полученных с околовертикального направления, к изменениям эффективности регистрации годоскопа, которые могли иметь место на протяжении длительного времени. Поток мюонов, формирующийся в этом диапазоне углов, соответствует средней энергии первичных протонов, составляет ≈ 80 ГэВ (медианная энергия ≈ 60 ГэВ). На рисунке 2.1. приведены временные ряды скорости счета событий в пересчете на один супермодуль с коррекцией на барометрический эффект в указанном диапазоне зенитных углов и вертикальной (A_Z) и двух горизонтальных (на ось юг-север – A_S и на ось восток-запад – A_E) проекций вектора локальной анизотропии.

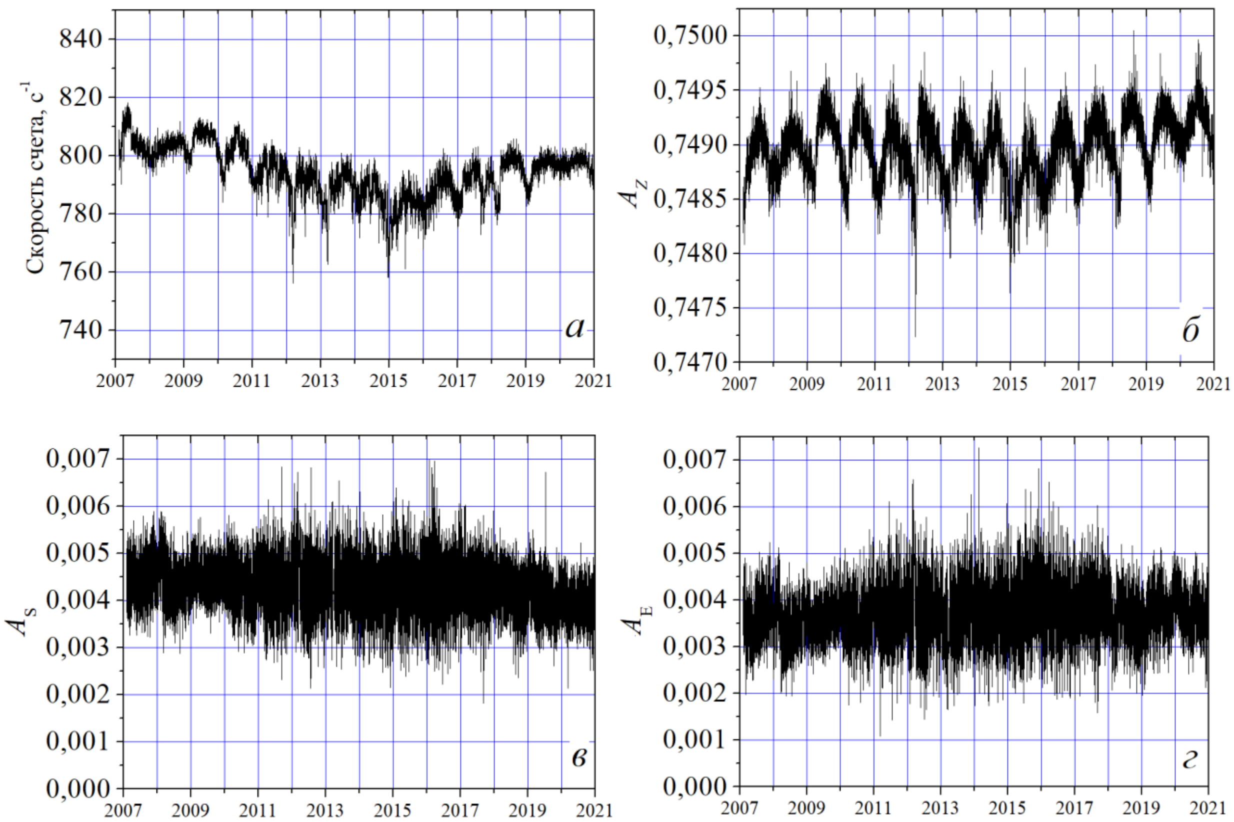


Рисунок 2.1. Временные ряды среднечасовых значений скорости счета годоскопа УРАГАН и проекций вектора локальной анизотропии в диапазоне зенитных углов 25 – 76º: а – скорость счета (в пересчете на один супермодуль); б – вертикальная проекция A_Z; в – проекция на ось юг-север – A_S; г – проекция на ось восток-запад – A_E

Суточные вариации вносят существенный вклад в общие вариации скорости счета и затрудняют восприятие информации. Для исключения этого эффекта целесообразно использовать временные ряды среднесуточной скорости счета и среднесуточных значений проекций вектора локальной анизотропии (рисунок 2.2).

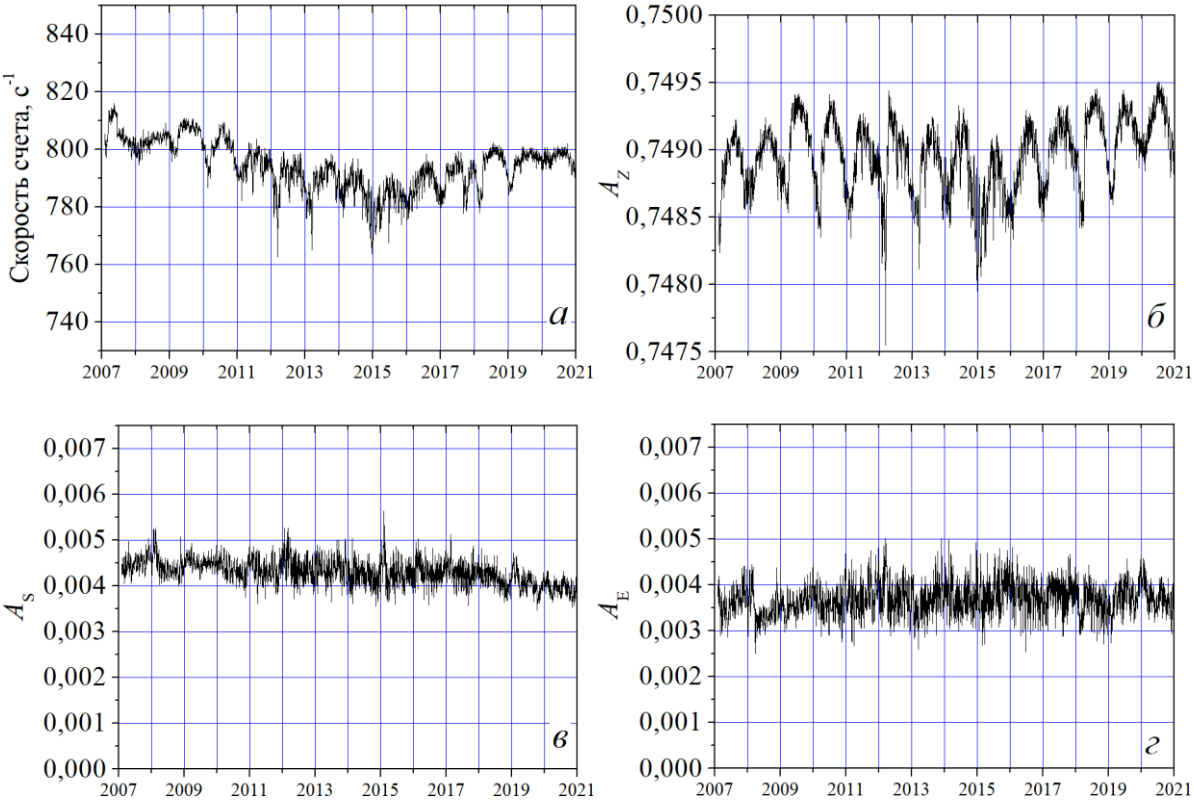


Рисунок 2.2. Временные ряды среднесуточных значений скорости счета годоскопа УРАГАН и проекций вектора локальной анизотропии в диапазоне зенитных углов 25 – 76º: а – скорость счета (в пересчете на один супермодуль); б – вертикальная проекция A_Z; в – проекция на ось юг-север – A_S; г – проекция на ось восток-запад – A_E

На рисунках 2.1 и 2.2 видно, что наблюдается годовой ход скорости счета мюонного годоскопа, который в основном определяется температурным эффектом. Также хорошо видны годовые изменения значений вертикальной проекции вектора локальной анизотропии A_Z, которые могут быть объяснены не только изменением температуры атмосферы, поскольку формы изменений скорости счета и величины A_Z также различаются. Годовой характер вариаций этой величины хорошо прослеживается с 2007 по 2020 гг. Амплитуды вариаций горизонтальных проекций A_S и A_E немного увеличиваются с 2011 года и сохраняются примерно на том же уровне до 2017 года, затем наблюдается их снижение к 2019 году.

Фурье-анализ временных рядов скорости счета и проекций вектора локальной анизотропии показывает, что спектры частот для них отличаются (рисунок 2.3).

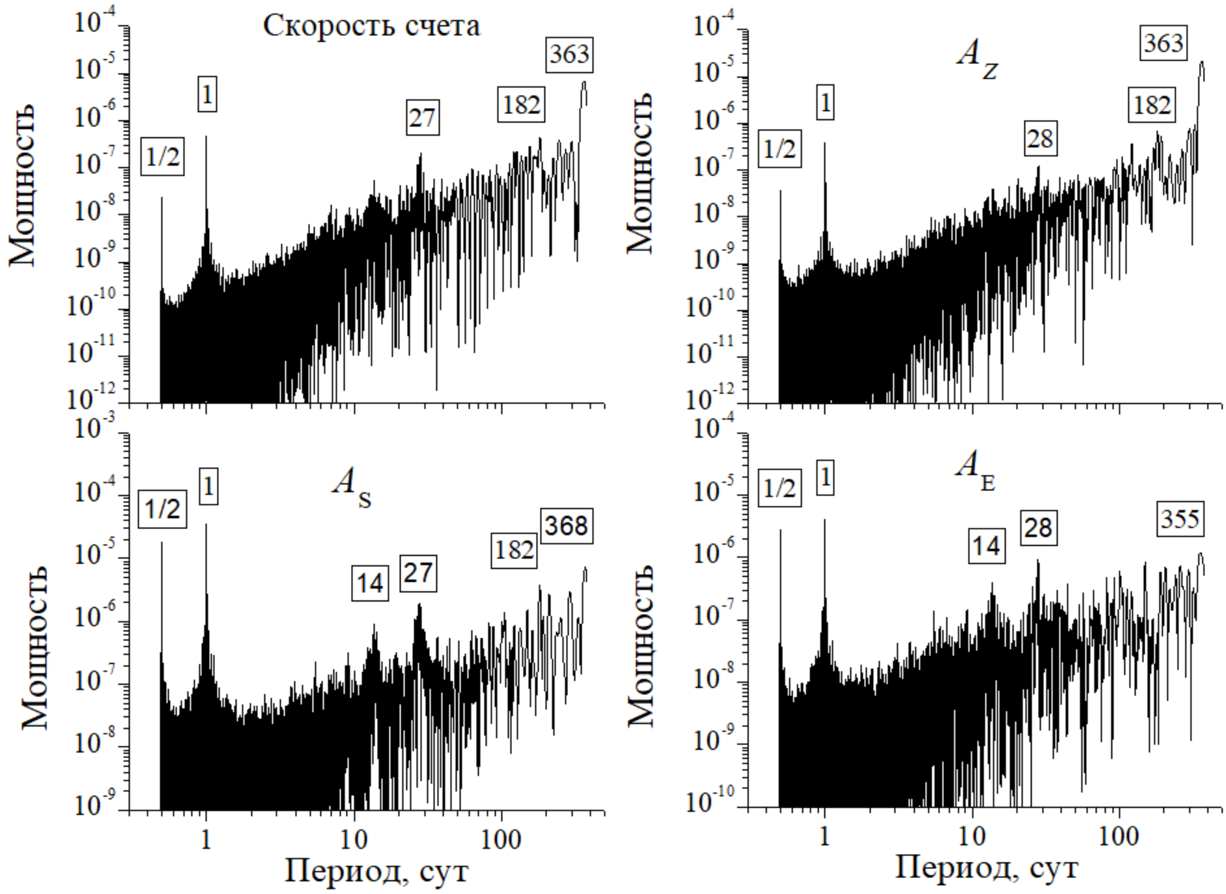


Рисунок 2.3. Фурье-спектр мощности временных рядов скорости счёта и проекций вектора локальной анизотропии в 2007 – 2020 гг. Вверху: слева – скорость счёта; справа – A_Z. Внизу: слева – A_S; справа – A_E. В прямоугольниках указаны значения периодов в сутках для соответствующих пиков

Фурье-спектр мощности, приведенный на рисунке 2.3, показывает, что общими для скорости счета и величин проекций вектора локальной анизотропии являются суточный, примерно 27-суточный и годовой периоды, хотя они и несколько отличаются. В вариациях горизонтальных проекций сильнее проявляется полусуточный период, а в вариациях скорости счета и A_Z менее заметен 27-суточный период. Фурье-спектр мощности по данным 2007 – 2020 гг. (рисунок 2.3) качественно согласуется со спектром, полученным по данным 2007 – 2011 гг. [90]. Можно отметить незначительное присутствие полугодового периода в вариациях A_Z, A_S, и скорости счёта, однако этот период не проявляется в вариациях A_E.

Таким образом, в вариациях вектора локальной анизотропии и, следовательно, углового распределения потока мюонов наблюдаются все известные периоды, обусловленные вращательными движениями Земли, Луны и Солнца.

2.1.2. Суточные отклонения

На протяжении всего периода измерений в вариациях проекций вектора локальной анизотропии наблюдается наличие сильных суточных колебаний, что позволяет провести их подробное исследование. Суточные изменения скорости счета и проекций вектора локальной анизотропии относительно их средних значений за год представлены на рисунке 2.4.

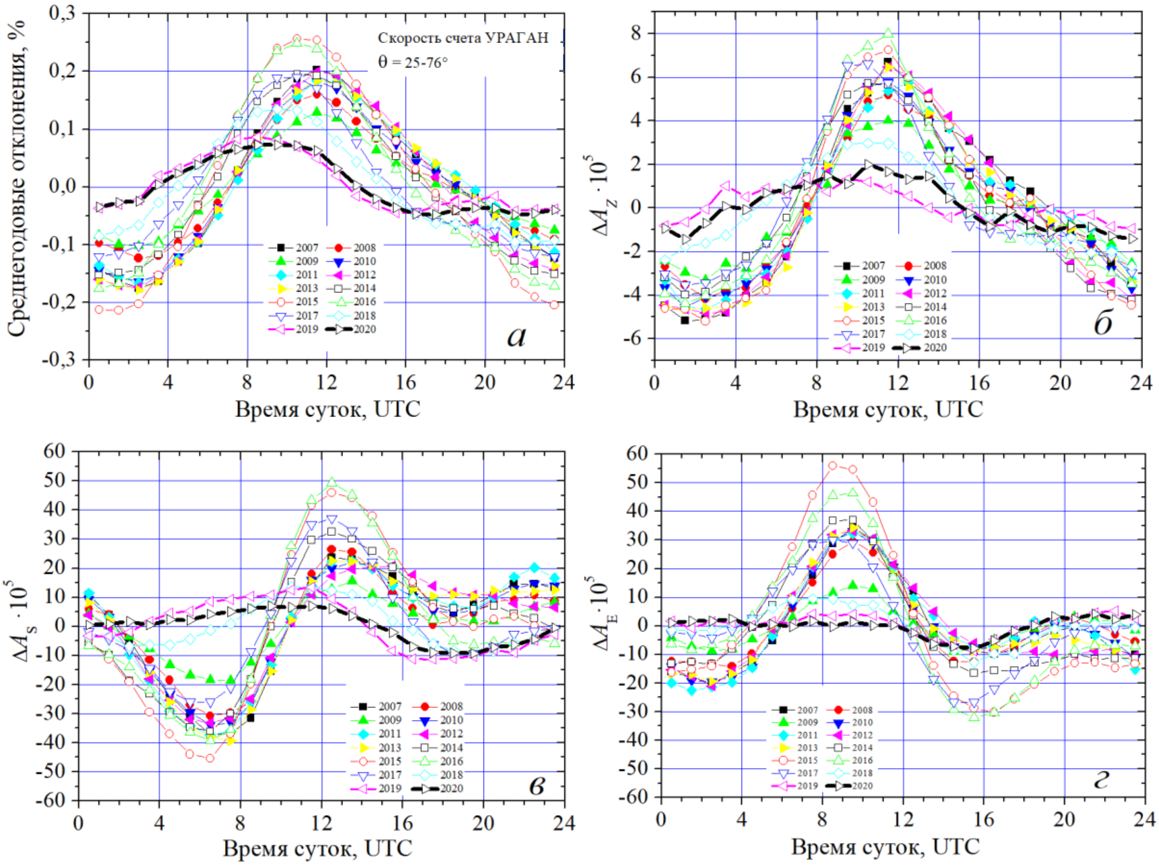


Рисунок 2.4. Среднегодовые отклонения скорости счета и проекций вектора локальной анизотропии в течение суток для 2007 – 2020 гг.:
а – скорость счета; б – A_Z; в – A_S; г – A_E

На рисунке 2.4 хорошо видно, что суточные вариации скорости счета и A_Z в отличие от их годовых изменений (см. рисунок 2.2) подобны и синфазны. А суточные изменения A_E и A_S сильно отличаются от вариаций скорости счета и A_Z. Необходимо отметить уменьшение магнитуды суточных отклонений в 2009 и 2018 годы, соответствующие минимуму солнечной активности, и ее увеличение в 2015 и 2016 годы. Формы среднегодовых отклонений в течение суток (рисунок 2.4) в 2012 – 2020 гг. в целом повторяют формы отклонений в 2010 и 2011 годы, однако в интервале времени 16h ÷ 23h UTC наблюдаются некоторые особенности. В 2014 – 2017 гг. примерно на час (ранее было 11 – 12h, а стало 10 – 11h) сместилось положение пика скорости счета и ΔA_Z. Отмечается аномальное поведение среднегодовых отклонений с 2018 по 2020 гг. по сравнению с другими годами, что может быть связано с изменением полярности Солнца, смена которой происходила в период максимума солнечной активности.

Корреляции среднегодовых суточных отклонений между проекциями вектора локальной анизотропии для 2007 – 2020 гг. представлены на рисунке 2.5.

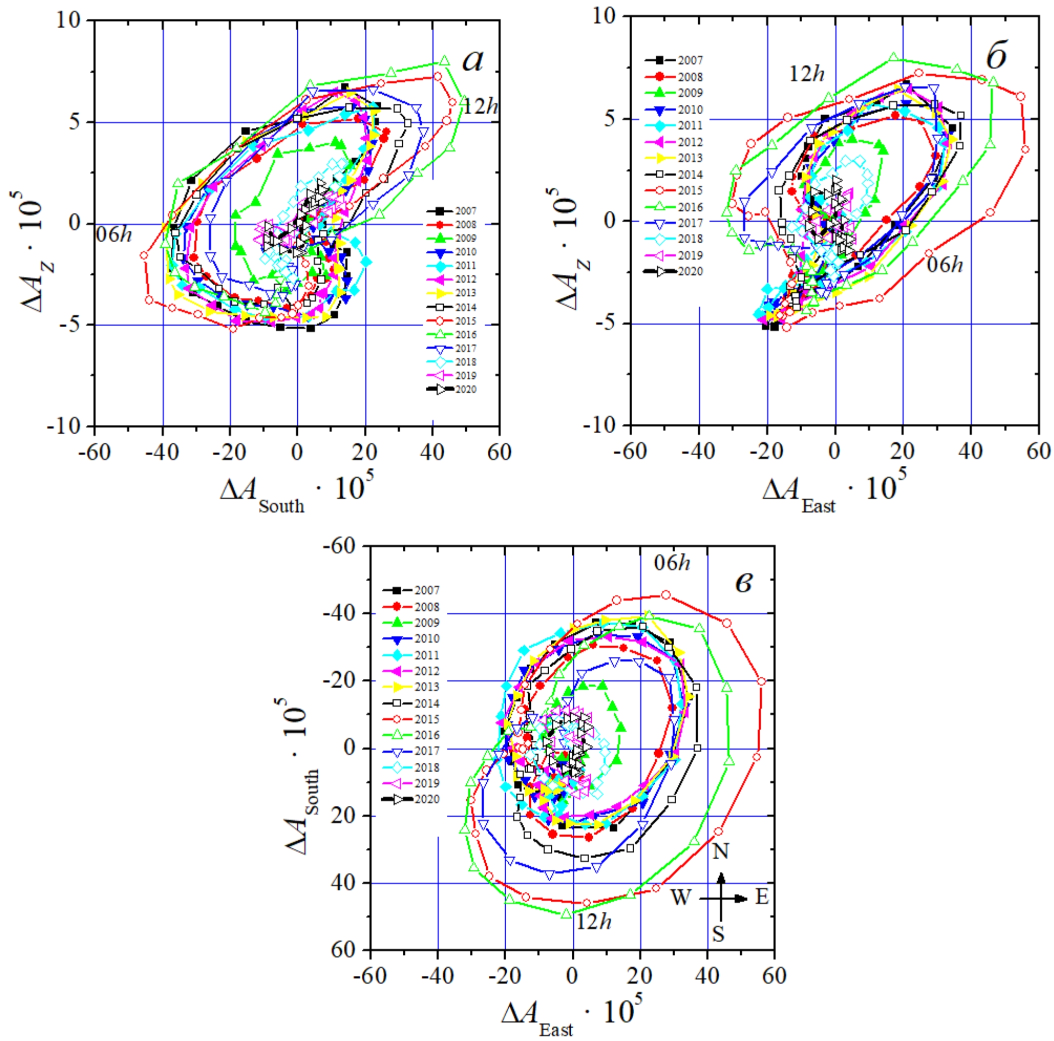


Рисунок 2.5. Корреляции среднегодовых суточных отклонений для 2007 – 2020 гг.: а) A_Z и A_S; б) A_Z и A_E; в) A_S и A_E (направления на стороны света приведены в правом нижнем углу графика). Для некоторых точек числами на графиках приведено время суток в UTC

Видно, что суточные изменения значений проекций вектора локальной анизотропии хорошо коррелируют между собой, а наблюдаемая кольцеобразная форма корреляций является стабильной и сохраняется на протяжении всего исследуемого периода с 2007 по 2020 гг. Маленькая петля на рисунке 2.5в соответствует околополуночным часам (по местному времени), а максимум отклонения – околополуденным часам. Следует отметить, что в корреляциях среднегодовых суточных отклонений, представленных на рисунке 2.5, между проекциями вектора локальной анизотропии за 2012 – 2020 гг. так же, как и на рисунке 2.4, заметна особенность в интервале 16h÷23h UTC.

2.1.3. Годовые вариации гармоник суточных отклонений

В течение всего исследуемого периода с 2007 по 2020 гг. анализ динамики суточного цикла основывался на помесячном усреднении часовых значений скорости счета и проекций вектора локальной анизотропии в зависимости от времени суток h_{day}. Впоследствии для каждого месяца суточные отклонения аппроксимировались методом наименьших квадратов суммой трех гармоник:

$$F(h_{day}) = C + \alpha_{24}\cos\left(\frac{h_{day} + 0.5 - \varphi_{24}}{24}2\pi\right) + \\ + \alpha_{12}\cos\left(\frac{h_{day} + 0.5 - \varphi_{12}}{12}2\pi\right) + \alpha_{8}\cos\left(\frac{h_{day} + 0.5 - \varphi_{8}}{8}2\pi\right), \tag{2.1}$$

где h_{day} – время суток в часах UTC; C – базовое значение; α_{xx} – амплитуда гармоники; φ_{xx} – фаза в часах UTC.

Результаты аппроксимации среднемесячных суточных изменений скорости счета и проекций вектора локальной анизотропии с 2007 по 2020 гг. представлены на рисунках 2.6 – 2.9.

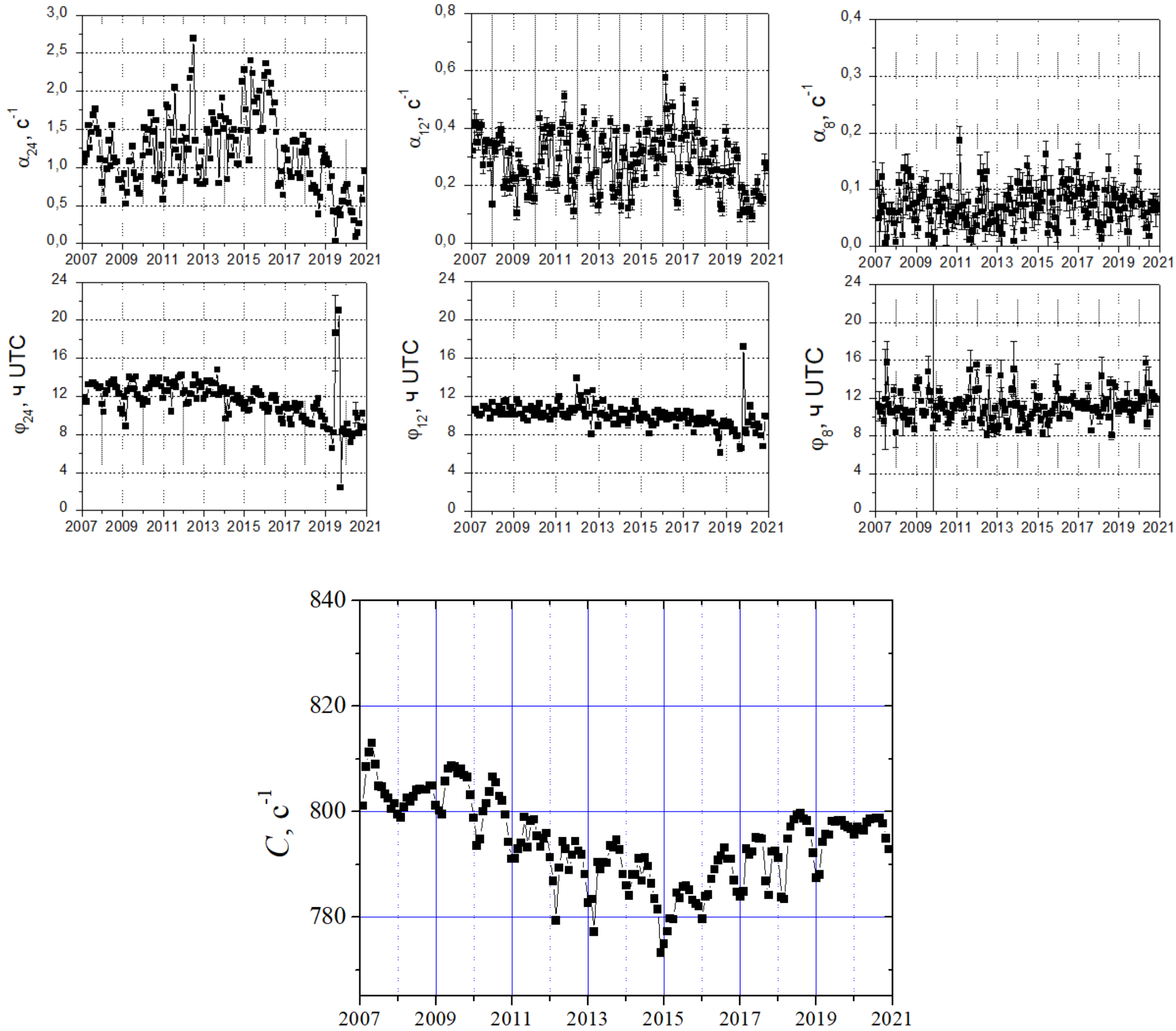


Рисунок 2.6. Изменения во времени амплитуд и фаз 24-, 12- и 8-часовых гармоник (вверху) и коэффициента С (внизу) среднемесячных суточных отклонений скорости счета

Во временных изменениях во времени амплитуды 24-часовой гармоники среднемесячных суточных отклонений скорости счета (рис. 2.6) можно отметить сильный рост в промежутке май – июль 2012 года, в конце 2013 – 2015 гг. и уменьшение – с 2016 по 2020 гг.

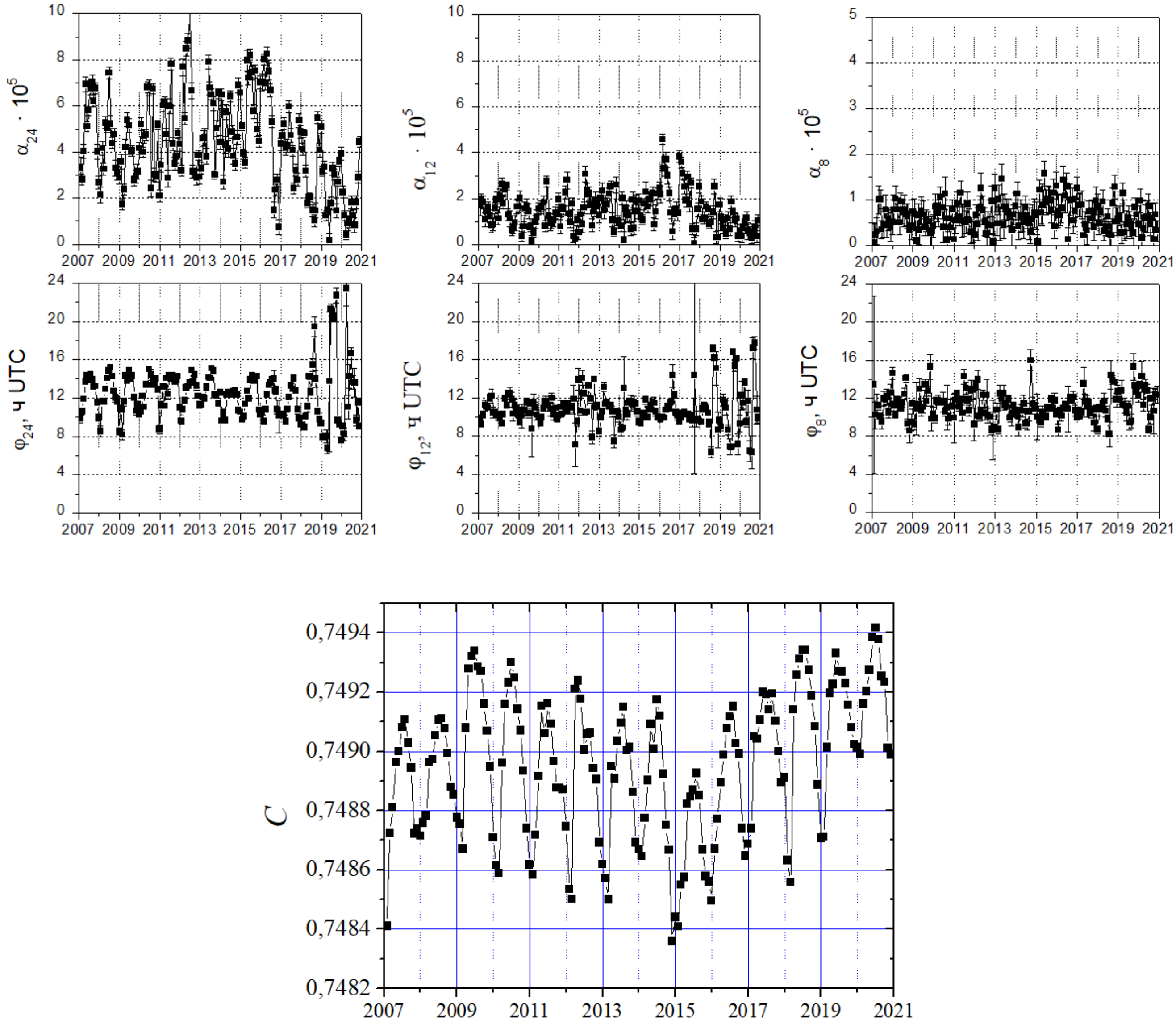


Рисунок 2.7. То же, что и на рисунке 2.6,
но для среднемесячных суточных отклонений A_Z

Во временных изменениях во времени амплитуды 24-часовой гармоники среднемесячных суточных отклонений A_Z (рисунок 2.7) можно отметить сильный рост с мая по июль 2012 года, а также усиление в течение 2012 года по сравнению с предшествующими годами флуктуаций фазы 12-часовой гармоники. В 2014 году происходит резкое уменьшение годовых колебаний фазы 24-часовой гармоники. В начале 2016 года наблюдается усиление амплитуды 12-часовой гармоники, а в конце 2016 года и 2018 – 2020 гг. – резкое уменьшение амплитуды 24-часовой гармоники.

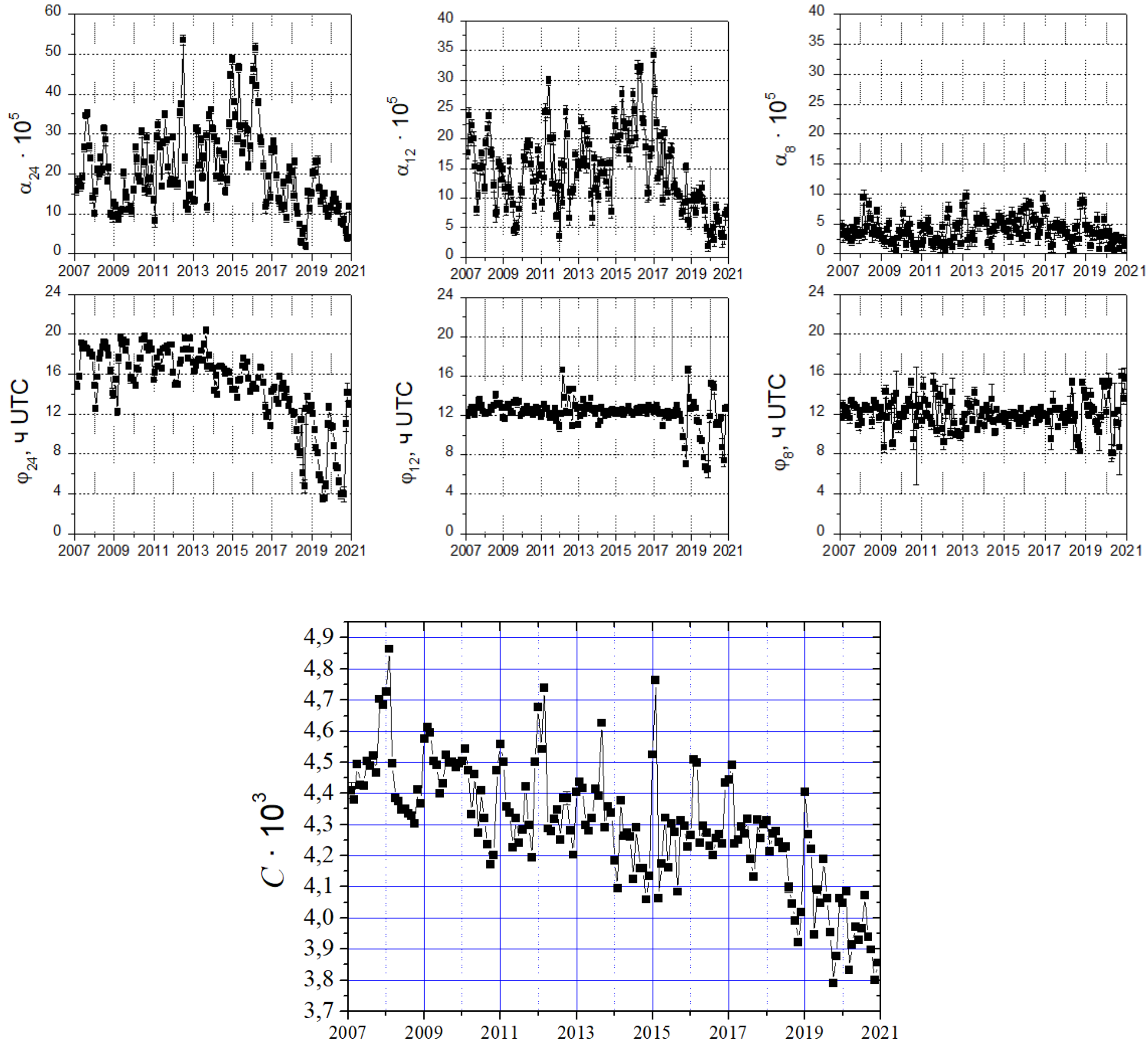


Рисунок 2.8. То же, что и на рисунке 2.6,
но для среднемесячных суточных отклонений A_S

Во временных изменениях во времени амплитуды 24-часовой гармоники среднемесячных суточных отклонений A_S (рис. 2.8) можно отметить сильный рост с мая по июль 2012 года, а также усиление в течение 2012 года по сравнению с предшествующими годами флуктуаций фазы 12-часовой гармоники. В 2012 – 2014 гг. наблюдается снижение постоянной составляющей *C*. С 2014 года заметно уменьшение годовых колебаний фазы 24-часовой гармоники. В конце 2016 года, в середине 2018 года и в конце 2020 года наблюдается уменьшение амплитуды и смещение фазы 24-часовой гармоники.

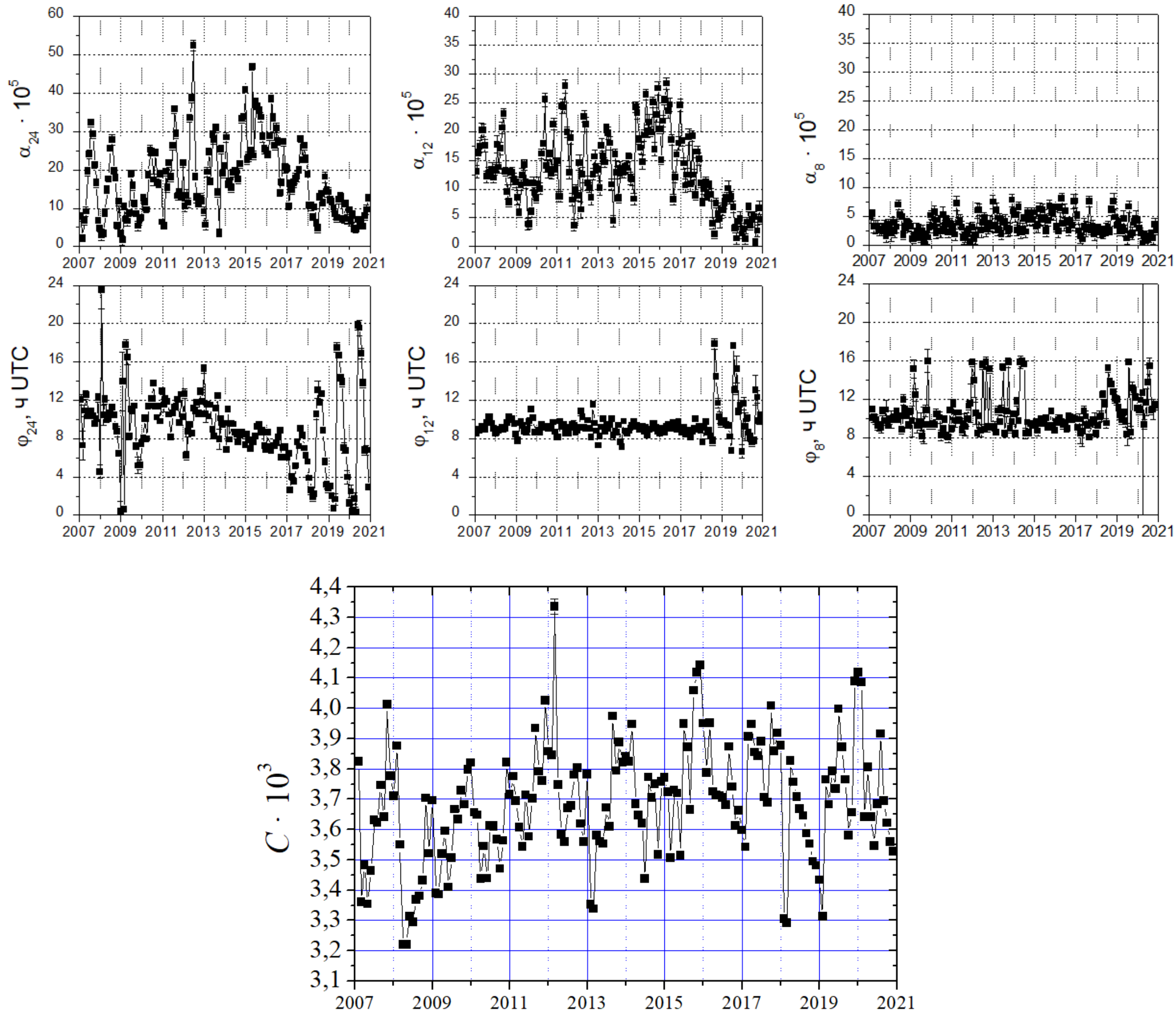


Рисунок 2.9. То же, что и на рисунке 2.6,
но для среднемесячных суточных вариаций A_E

Во временных изменениях во времени амплитуды 24-часовой гармоники среднемесячных суточных отклонений A_E (рис. 2.9) можно отметить сильный рост с мая по июль 2012 года, а также усиление в течение 2012 года по сравнению с предшествующими годами флуктуаций фазы 12-часовой гармоники. С 2014 года наблюдается смещение фазы 24-часовой гармоники, а в 2017 – 2020 гг. заметно усиление годовых изменений.

В целом в вариациях угловых характеристик потока мюонов по данным 2007 – 2020 гг. начинает проявляться цикличность солнечной активности. Выделяются годы спада активности – 2007 – 2008, год минимума активности – 2009, годы роста активности

– 2010 – 2011 и годы пика активности – 2012 – 2015. С 2016 года начинает проявляться спад активности до очередного минимума, приходящегося на 2019 – 2020 гг.

2.2. Сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН и нейтронных мониторов в период с 2008 по 2020 гг.

Долговременные вариации характеристик потока мюонов, регистрируемых в годоскопическом режиме, были использованы для сопоставления с другими детекторами космических лучей, в частности с нейтронными мониторами (НМ), которые имеют более низкие первичные энергии и, соответственно, являются более чувствительными к гелиосферным возмущениям. Для этого была исследована связь между вариациями потока нейтронов, регистрируемых нейтронными мониторами, и вариациями потока мюонов, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН, в том числе при возмущенном состоянии околоземного пространства. Данные мюонного годоскопа УРАГАН были сопоставлены с данными нейтронных мониторов в Москве (MOSC) и Апатитах (APTY) [91]. Выбор этих мониторов обусловлен следующим: Московский нейтронный монитор [92] расположен на одной с МГ УРАГАН географической широте и имеет ту же пороговую жесткость (2.45 ГВ); нейтронный монитор Апатиты [93] имеет меньшую пороговую жесткость (0.65 ГВ), но схожие с МГ УРАГАН асимптотические направления прихода первичных КЛ. Для сопоставления вариаций потока мюонов и нейтронов используются часовые данные за период с 2008 по 2020 гг., на который приходятся различные фазы солнечной активности: минимум, рост и максимум. Анализируются и сопоставляются интегральные скорости счета, темп изменения интегральной скорости счета, а также амплитуды среднесуточных модуляций КЛ, в том числе при изменениях характеристик межпланетного магнитного поля.

2.2.1. Сравнение данных нейтронных мониторов MOSC и APTY и мюонного годоскопа УРАГАН

Для анализа использовались данные нейтронных мониторов, скорректированные на барометрический эффект, и данные МГ УРАГАН с коррекцией на барометрический и температурный эффект. Скорость счета нейтронных мониторов представляет собой число зарегистрированных частиц за одну минуту (в среднем за исследуемый период для MOSC оно составляет около 9.5 тысяч частиц, 10.5 тысяч частиц – для APTY). При этом скорость счета МГ УРАГАН равна числу частиц за одну секунду (в среднем по 1.4

тысячи реконструированных треков мюонов на каждом из трех годоскопов, входящих в состав МГ УРАГАН). Таким образом, интегральная скорость счета трех супермодулей УРАГАН почти в 30 раз превышает скорость счета нейтронных мониторов. За одну минуту годоскоп регистрирует около 250 тысяч мюонов. На рисунке 2.10 представлены временные изменения интегральной скорости счета нейтронного монитора MOSC, APTY и мюонного годоскопа УРАГАН.

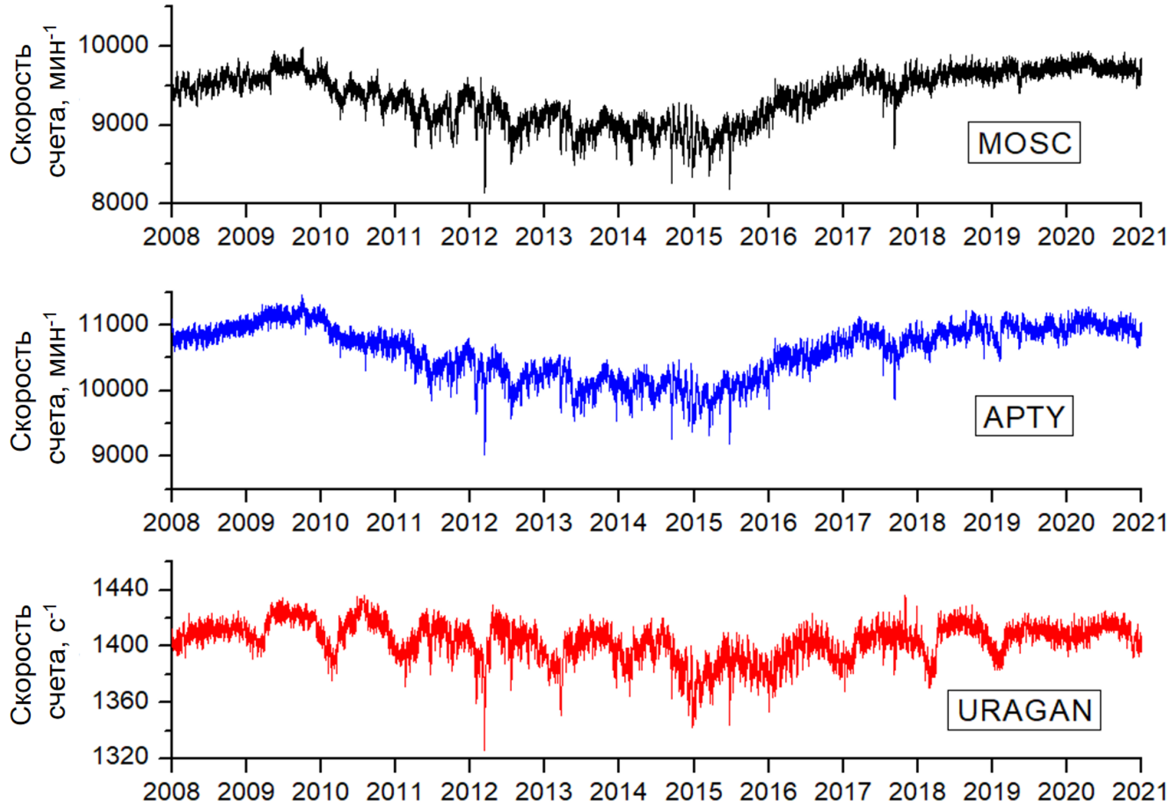
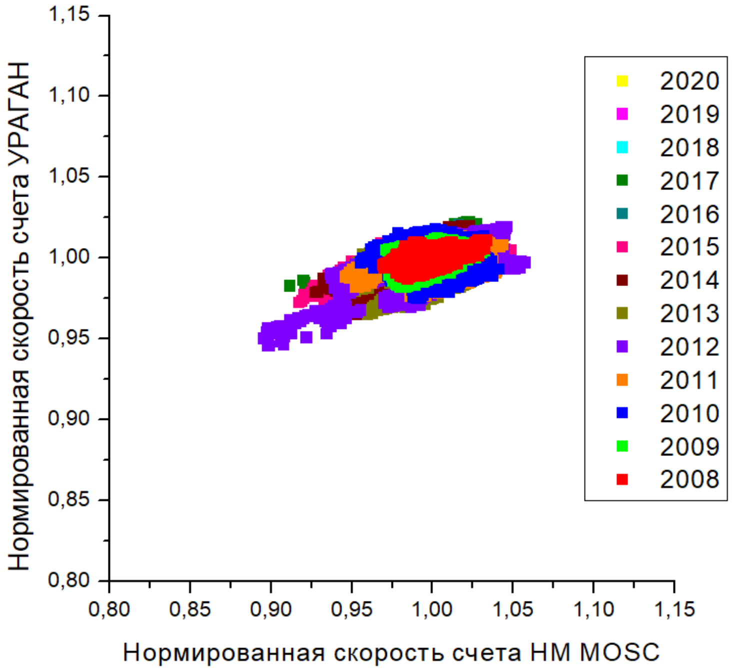


Рисунок 2.10. Интегральные скорости счета MOSC, APTY и МГ УРАГАН за период с 2008 по 2020 гг.

На рисунке 2.10 хорошо видно, что с 2010 года наблюдается тенденция к уменьшению скорости счета нейтронных мониторов, вызванная ростом солнечной активности, в то же время подобный эффект скорости счета мюонов по данным МГ УРАГАН проявился значительно слабее. Затем с 2015 года наблюдается рост скорости счета как в нейтронной компоненте космических лучей, так и в мюонной. Следует отметить, что в потоке мюонов более выражены годовые вариации.

Для описания количественных зависимостей между интегральными скоростями счета потока нейтронов, регистрируемых нейтронными мониторами MOSC и APTY, и потока мюонов по данным МГ УРАГАН рассмотрены корреляционные зависимости и получены коэффициенты корреляций (см. рисунок 2.11).



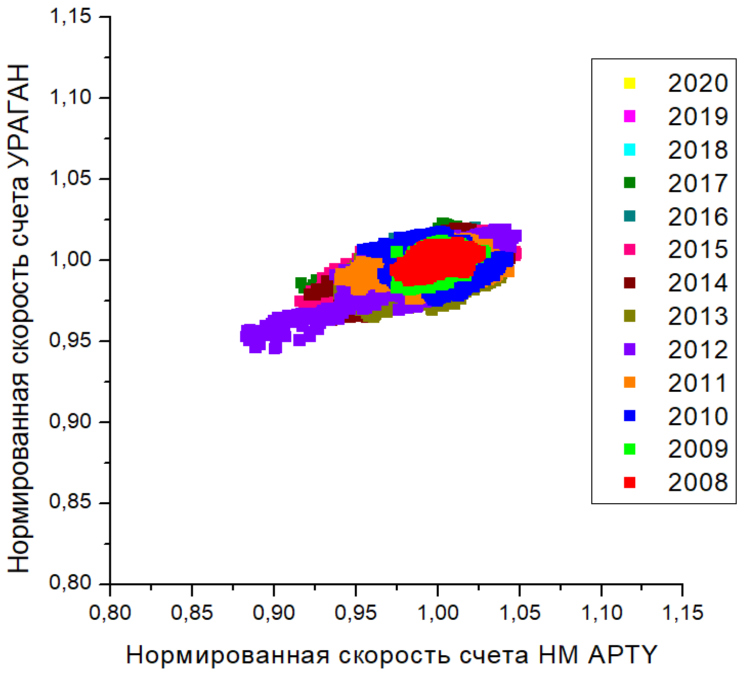


Рисунок 2.11. Корреляционные зависимости нормированных интегральных скоростей счета между НМ MOSC и МГ УРАГАН (сверху) и НМ APTY и МГ УРАГАН (снизу) за период с 2008 по 2020 гг.

На рисунке 2.11 весь анализируемый период с 2008 по 2020 гг. разбит по годам при помощи различных цветов. Видно, что коэффициенты пропорциональности по годам различаются между собой, поэтому подобные корреляции были построены для каждого года отдельно. Основные параметры – коэффициент корреляции *R* и коэффициент пропорциональности *b*, полученные по годам, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Коэффициенты корреляции (R) и пропорциональности (b) между скоростями счета мюонного годоскопа УРАГАН, нейтронных мониторов MOSC и APTY

Параметры / Год	*НМ MOSC & НМ APTY*		*НМ MOSC и МГ УРАГАН*		*НМ APTY и МГ УРАГАН*	
	b	*R*	*b*	*R*	*b*	*R*
2008 – 2020	0.89	0.84	0.18	0.35	0.17	0.35
2008	0.61	0.70	0.18	0.48	0.26	0.60
2009	0.44	0.58	0.34	0.55	0.41	0.53
2010	0.69	0.69	-0.04	-0.06	-0.19	-0.29
2011	0.76	0.79	0.03	0.08	-0.04	-0.11
2012	0.98	0.94	0.20	0.48	0.23	0.57
2013	1.01	0.95	-0.02	-0.04	-0.02	-0.04
2014	0.98	0.94	0.39	0.69	0.38	0.70
2015	0.98	0.93	0.23	0.57	0.25	0.67
2016	0.91	0.89	0.26	0.46	0.23	0.42
2017	1.00	0.87	0.13	0.24	0.12	0.26
2018	1.13	0.78	0.76	0.68	0.51	0.67
2019	0.87	0.54	0.30	0.38	0.24	0.49
2020	0.97	0.74	0.18	0.28	0.15	0.32

На рисунке 2.12 представлены изменения коэффициента *R* между нормированными интегральными скоростями счета (слева) и его скоростью изменения за 1 час (справа) нейтронных мониторов и МГ УРАГАН и в период с 2008 по 2020 гг. Для сравнения на рисунке 2.12 представлено число солнечных пятен [94]. На рисунке видно, что коэффициент корреляции между интегральными темпами счета у детекторов отличается. Наилучшие корреляции наблюдается между нейтронными мониторами в Москве и Апатитах. Корреляции нейтронных мониторов с мюонным годоскопом хуже. Однако стоит отметить, что наилучшие корреляции наблюдается во время максимума солнечной активности в 2014 – 2015 гг. При этом поведение коэффициентов корреляции между интегральными скорости счета у детекторов не зависит от солнечной активности (см. верхний рисунок). Коэффициенты корреляции темпа изменения скорости счета у нейтронных мониторов и МГ УРАГАН ниже, чем при интегральном темпе счета, но при этом можно отметить влияние солнечной активности. Во время ее повышения (2012 – 2015 гг.) наблюдаются наибольшие коэффициенты корреляции.

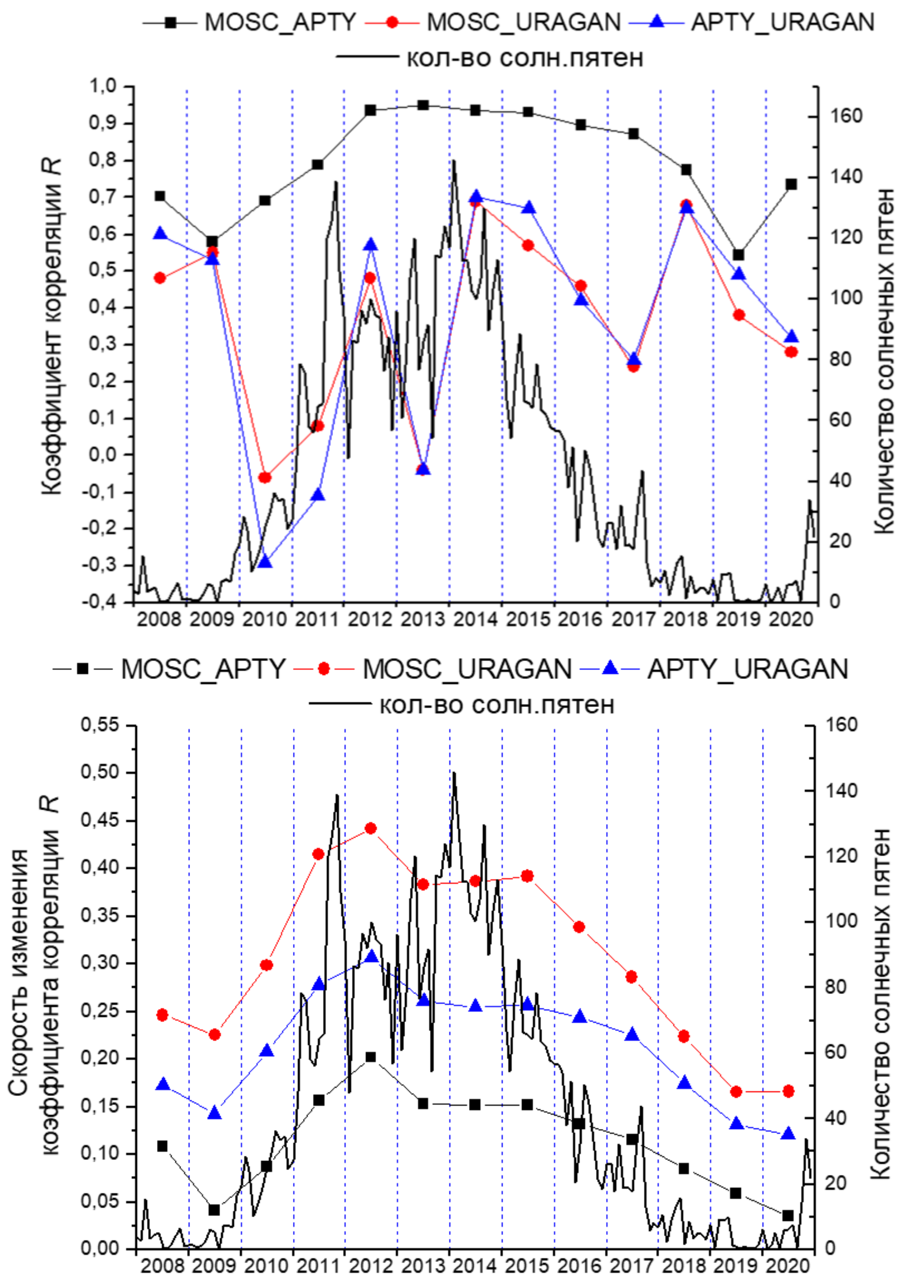


Рисунок 2.12. Изменения коэффициента корреляции R между нормированными интегральными темпами счета (вверху) MOSC и APTY, MOSC и УРАГАН, APTY и УРАГАН и скоростью изменения коэффициентов корреляции их темпов счета (внизу). Сплошная линия – число солнечных пятен (на правых осях)

Важным параметром, характеризующим вариации космических лучей, является суточный разброс, который определяет чувствительность детектора к различным физическим процессам. На рисунке 2.13 представлены среднегодовые суточные отклонения для каждого детектора отдельно по годам. Статистическая погрешность находится в рамках точек, указанных на графиках.

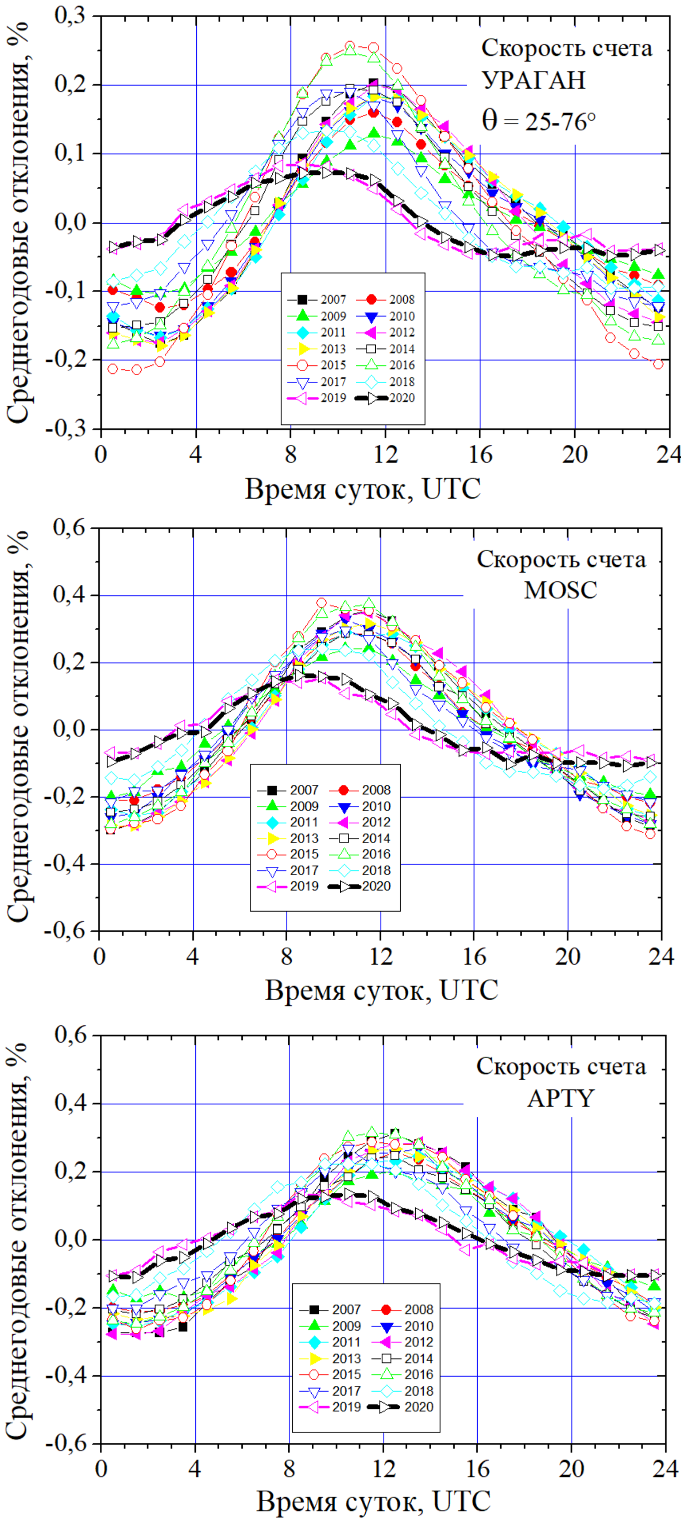


Рисунок 2.13. Среднегодовые суточные отклонения интегральных скоростей счета МГ УРАГАН (вверху), MOSC (в центре) и APTY (внизу)

На рисунке 2.13 видно, что суточные изменения как для мюонного годоскопа, так и для нейтронных мониторов синфазны в период с 2007 по 2018 гг. Если говорить о периоде с 2007 по 2018 гг., то минимальный размах наблюдается в 2009 году, что соответствует минимуму солнечной активности. Наибольший размах отмечается в 2015 году. Он приходится на максимум солнечной активности. Максимум отклонений приходится на 11 – 12 часов UTC. В 2019 и 2020 годах для всех трех детекторов наблюдается аномальное поведение, а именно: размах суточных отклонений значительно уменьшается даже по сравнению с прошлым минимумом, фиксируемом в 2009 году, наблюдается смещение максимума на 8 – 9 часов UTC. Такое аномальное поведение может быть связано с тем, что полярности Солнца в минимуме 2009 года и 2019 года противоположны.

2.2.2. Сопоставление данных МГ УРАГАН с данными НМ во время гелиосферных возмущений

Сопоставление экспериментальных данных МГ УРАГАН с данными нейтронных мониторов во время гелиосферных возмущений в период с 2008 по 2020 гг. проводилось на основе исследования коэффициентов корреляции интегральных скоростей счета и темпа их изменения (приращения) между МГ УРАГАН и нейтронными мониторами в зависимости от изменений параметров солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и магнитосферы Земли, а также корреляционных зависимостей усредненных по месяцам суточных среднеквадратичных отклонений данных детекторов мюонов и нейтронов с параметрами, характеризующими солнечную активность.

Для каждого года по отдельности и для всего рассматриваемого периода были исследованы зависимости коэффициентов корреляции темпа счета МГ УРАГАН и нейтронных мониторов от порогового значения следующих параметров: скорости солнечного ветра V_{sw}, напряженности межпланетного магнитного поля B_t и геомагнитного индекса *Dst*, полученных из базы данных OMNI [95, 96]. Для каждого параметра были выбраны минимальные значения, с которых начинался расчет коэффициентов корреляции. Например, для B_t: – 0, а каждое следующее значение рассчитывалось с шагом в 1 нТл: 0, 1, …i,… (i принимает целые значения). Для каждого значения B_t строились зависимости скорости счета МГ УРАГАН от скорости счета нейтронных мониторов (MOSC и APTY) и зависимость темпа изменения скорости счета МГ УРАГАН за час от темпа изменения скорости счета нейтронных мониторов (также MOSC или APTY). Если для текущей пороговой индукции магнитного поля имелось не менее 30 точек, то методом наименьших квадратов определялись коэффициенты линейной зависимости и рассчитывался коэффициент корреляции R_i. Максимальное значение напряженности магнитного поля, для которого еще выполнялось требование по минимальному количеству точек, составило 20 нТл. Результаты анализа представлены на рисунках 2.14 и 2.15.

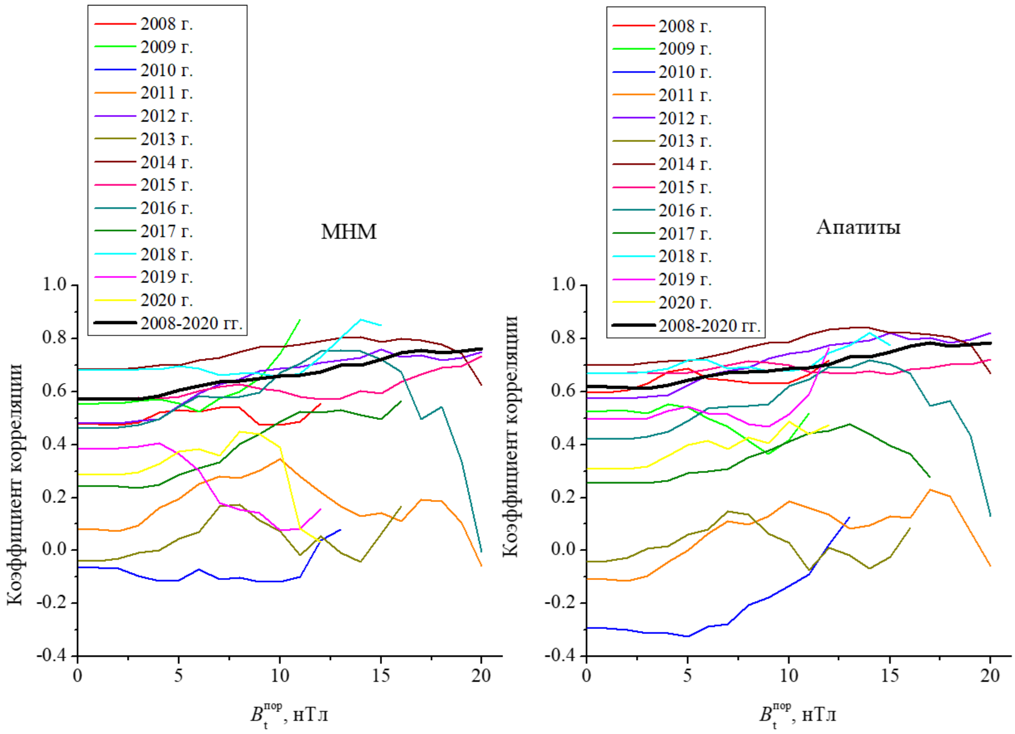


Рисунок 2.14. Зависимости коэффициентов корреляций интегральных скоростей счета МГ УРАГАН и MOSC (слева), МГ УРАГАН и APTY (справа) от значений вектора магнитной индукции по годам и за весь период в целом

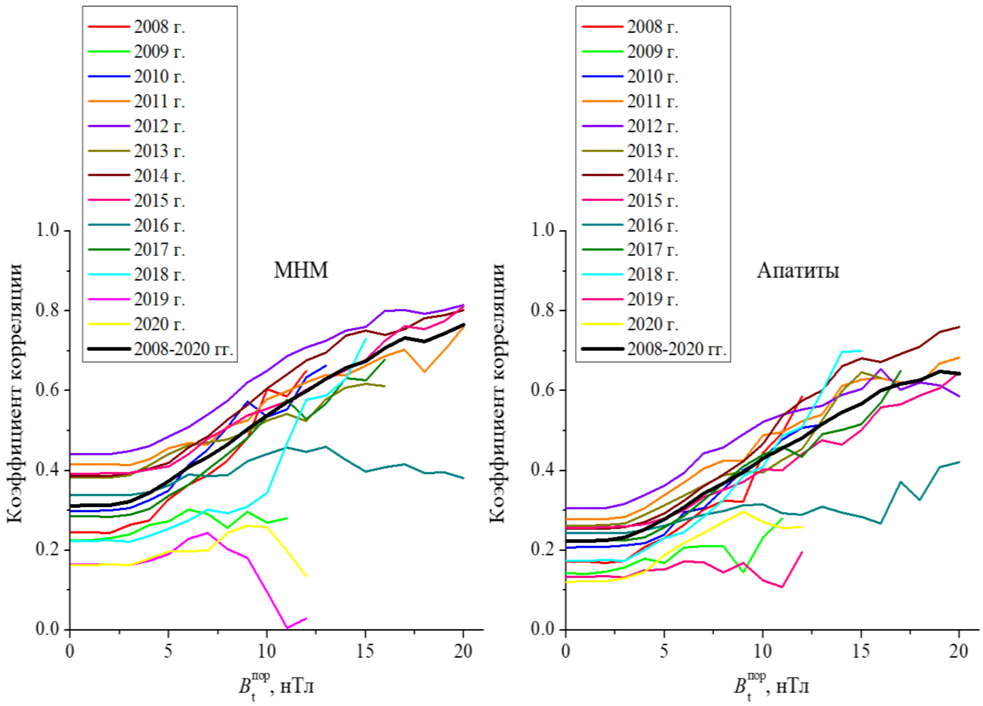


Рисунок 2.15. Зависимости коэффициентов корреляций темпа изменения интегральных скоростей счета МГ УРАГАН и MOSC (слева), МГ УРАГАН и APTY (справа) от вектора магнитной индукции по годам и за весь период в целом

На рисунке 2.14 представлены зависимости коэффициентов корреляций интегральных скоростей счета МГ УРАГАН и нейтронного монитора MOSC (слева), а также МГ УРАГАН и нейтронного монитора APTY (справа) от значений вектора магнитной индукции по годам и за весь период в целом. На рисунке 2.15 представлены соответствующие корреляции темпа изменения интегральных скоростей счета. Из рисунков следует, что для интегральных скоростей счета зависимости от магнитной индукции практически не наблюдается, лишь при больших значениях в период максимума солнечной активности отмечается резкое падение коэффициентов корреляции. При этом для темпов изменения скорости счета коэффициент корреляции растет при увеличении значений магнитной индукции, т.е. в годы с повышенной солнечной активностью наблюдается наилучшая корреляция. В минимуме солнечной активности (2009, 2019, 2020 годы) коэффициенты корреляции минимальны и не увеличиваются при росте значений индукции межпланетного магнитного поля.

На рисунке 2.16 приведены среднемесячные значения скорости счета МГ УРАГАН и MOSC, МГ УРАГАН и APTY (рисунки а и б соответственно) и суточные среднеквадратичные отклонения МГ УРАГАН и MOSC, МГ УРАГАН и APTY (рисунки в и г) за период с 2007 по 2020 гг.

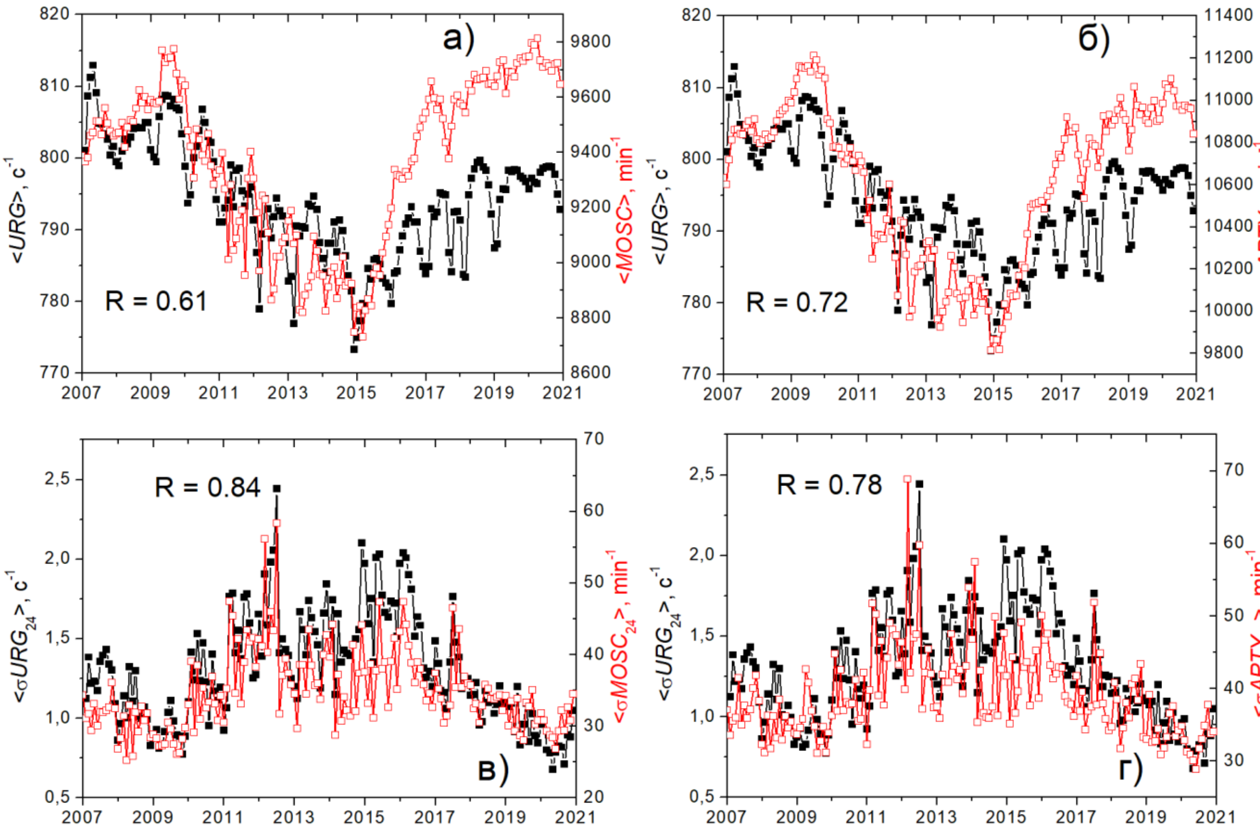


Рисунок 2.16. Среднемесячные значения скорости счета (а, б) и суточные среднеквадратичные отклонения (в, г) данных МГ УРАГАН, MOSC и APTY

Расчет суточного среднеквадратичного отклонения (σI_{24}) проводился по следующей формуле:

$$\sigma I_{24} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{24} I_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{24} I_i}{n} \right)^2 \right) \frac{n}{n-1}} \qquad (2.2)$$

На рисунке 2.16 (а и б) видно, что корреляции с нейтронным монитором в Апатитах лучше, чем с московским (коэффициенты корреляции 0.72 и 0.61 соответственно), при этом в обоих случаях наблюдаются значительные различия усреднённой скорости счета, начиная с 2016 года. На рисунке 2.16 (в и г) видно, что корреляции среднеквадратичных отклонений больше, чем корреляции со скоростью счета. Коэффициенты корреляции имеют значения 0.78 и 0.84 для нейтронных мониторов в APTY и MOSC соответственно. Поэтому для дальнейшего сопоставления указанных параметров с параметрами околоземного пространства (скорость солнечного ветра, геомагнитные индексы *Dst* и *Kp*, вектор магнитной индукции B_t и его проекция на ось Z) были использованы усредненные по месяцам суточные среднеквадратичные отклонения.

Особый интерес для сопоставления вариаций потока мюонов и нейтронов представляет исследование корреляционных связей между параметрами солнечной активности, данными УРАГАН и нейтронных мониторов по отдельности. На рисунке 2.17 представлены результаты сопоставления усредненных по месяцам суточных среднеквадратичных отклонений данных УРАГАН со скоростью солнечного ветра (а), геомагнитными индексами *Dst* (б) и *Kp* (в), вектором магнитной индукции B_t (г) и его проекцией на ось Z (д) за период с 2008 по 2020 гг. На каждом рисунке представлен коэффициент корреляции между анализируемыми параметрами. Наилучшие корреляции среднемесячных среднеквадратичных отклонений интегральной скорости счета МГ УРАГАН наблюдаются с параметрами межпланетного магнитного поля – B_t и B_z, а также с индексом геомагнитной активности *Dst*.

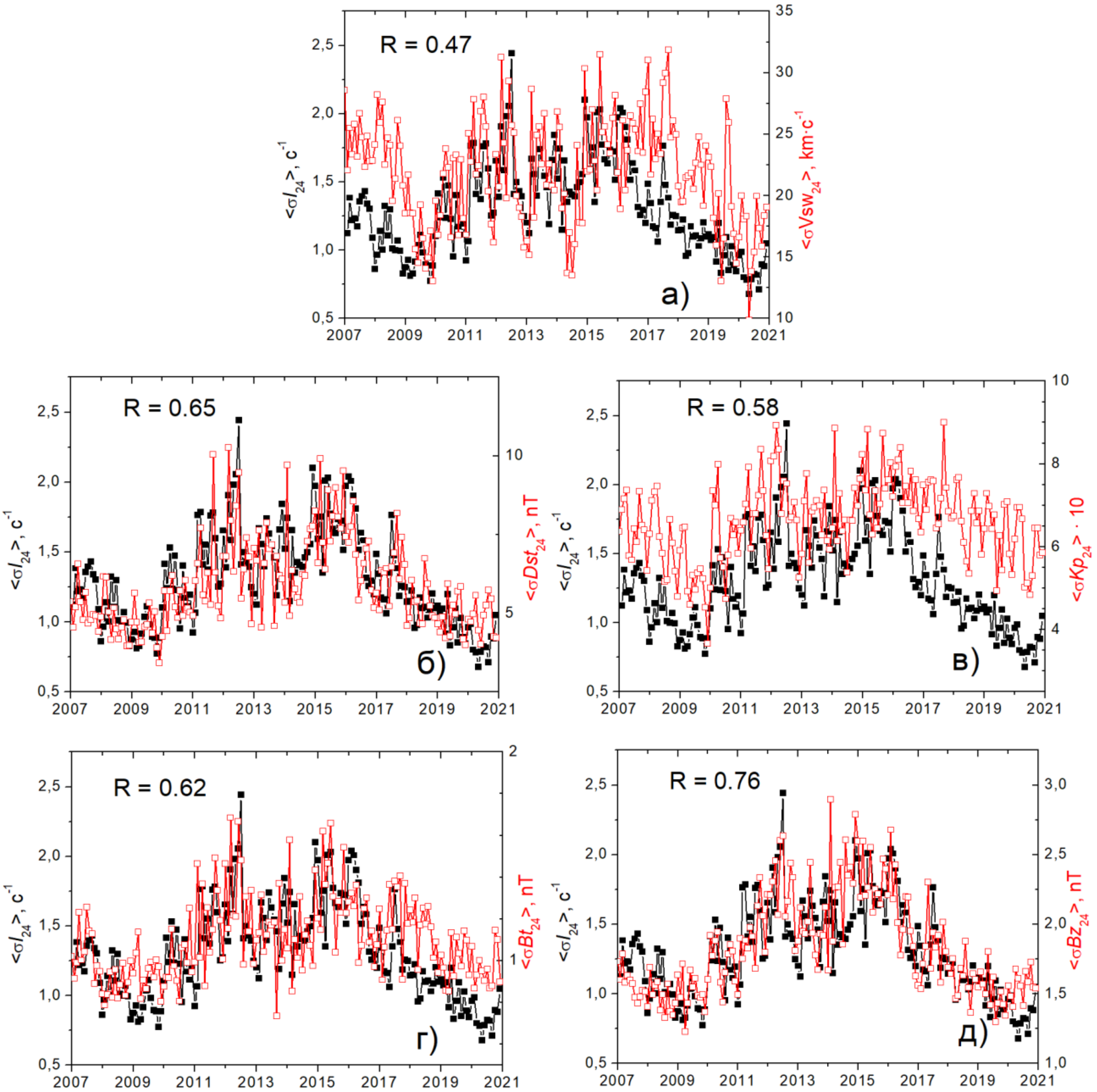


Рисунок 2.17. Сопоставления усредненных по месяцам суточных среднеквадратичных отклонений данных МГ УРАГАН со скоростью солнечного ветра (а), геомагнитным индексом Dst (б), Kp-индексом (в), вектором магнитной индукции (г) и его проекцией на ось Z (д)

Аналогичным образом было проведено сопоставление усредненных по месяцам суточных среднеквадратичных отклонений данных MOSC и APTY. Результаты представлены в таблице 2.2. Наилучшие корреляции для нейтронных мониторов наблюдаются с параметрами межпланетного магнитного поля (B_t и B_z) и *Dst*-индексом.

Таблица 2.2. Коэффициенты корреляций усредненных по месяцам суточных среднеквадратичных отклонений данных МГ УРАГАН и MOSC со скоростью солнечного ветра, геомагнитными индексами и параметрами ММП

	$\langle\sigma V_{sw24}\rangle$	$\langle\sigma Dst_{24}\rangle$	$\langle\sigma Kp_{24}\rangle$	$\langle\sigma B_{t24}\rangle$	$\langle\sigma B_{z24}\rangle$
$\langle\sigma I_{24}\rangle$ URG	0.47	0.65	0.58	0.62	0.76
$\langle\sigma I_{24}\rangle$MOSC	0.36	0.72	0.56	0.67	0.66
$\langle\sigma I_{24}\rangle$APTY	0.41	0.70	0.57	0.67	0.60

Результаты, представленные в таблице, показывают, что коэффициенты корреляции между параметрами вариаций мюонов и нейтронов и характеристиками СВ, ММП и МПЗ слабо отличаются, несмотря на более высокие энергии первичных частиц для мюонов. Использование усредненных по месяцам суточных среднеквадратичных отклонений данных детекторов космических лучей может оказаться полезным для исследования долговременных изменений солнечной активности.

Особый интерес представляет изучение влияния межпланетной среды на анизотропию потока космических лучей. Подобные исследования представлены в работах [81] и [97]. На рисунке 2.18 приведены корреляции среднемесячных значений r_h со среднемесячными значениями параметров межпланетного магнитного поля и индексами геомагнитной активности в период с 2007 по 2020 гг. Черными точками отмечены значения за 2007 – 2017 гг., синими точками на рисунках отмечены значения за 2018 – 2020 гг. Видно, что наилучшие корреляции наблюдаются в период с 2007 по 2017 гг.; в 2018 – 2020 гг. в период окончания 24-го солнечного цикла – минимума солнечной активности – наблюдается аномальное поведение зависимостей, что соответствует рисункам 2.4, 2.5 и 2.13. Аппроксимация показана линейной функцией (красная линия) для данных с 2007 по 2017 гг. Видно, что наилучшие корреляции в этот период наблюдаются между r_h и вектором магнитной индукции B_t (коэффициент корреляции ≈ 0.76), а также между параметром r_h и индексом геомагнитной активности Kp (коэффициент корреляции ≈ 0.77). Для параметра $V_m B_m$ [98] и *Dst*-индекса наблюдаются более слабые корреляции (коэффициенты корреляции соответственно ≈ 0.68 и ≈ 0.45).

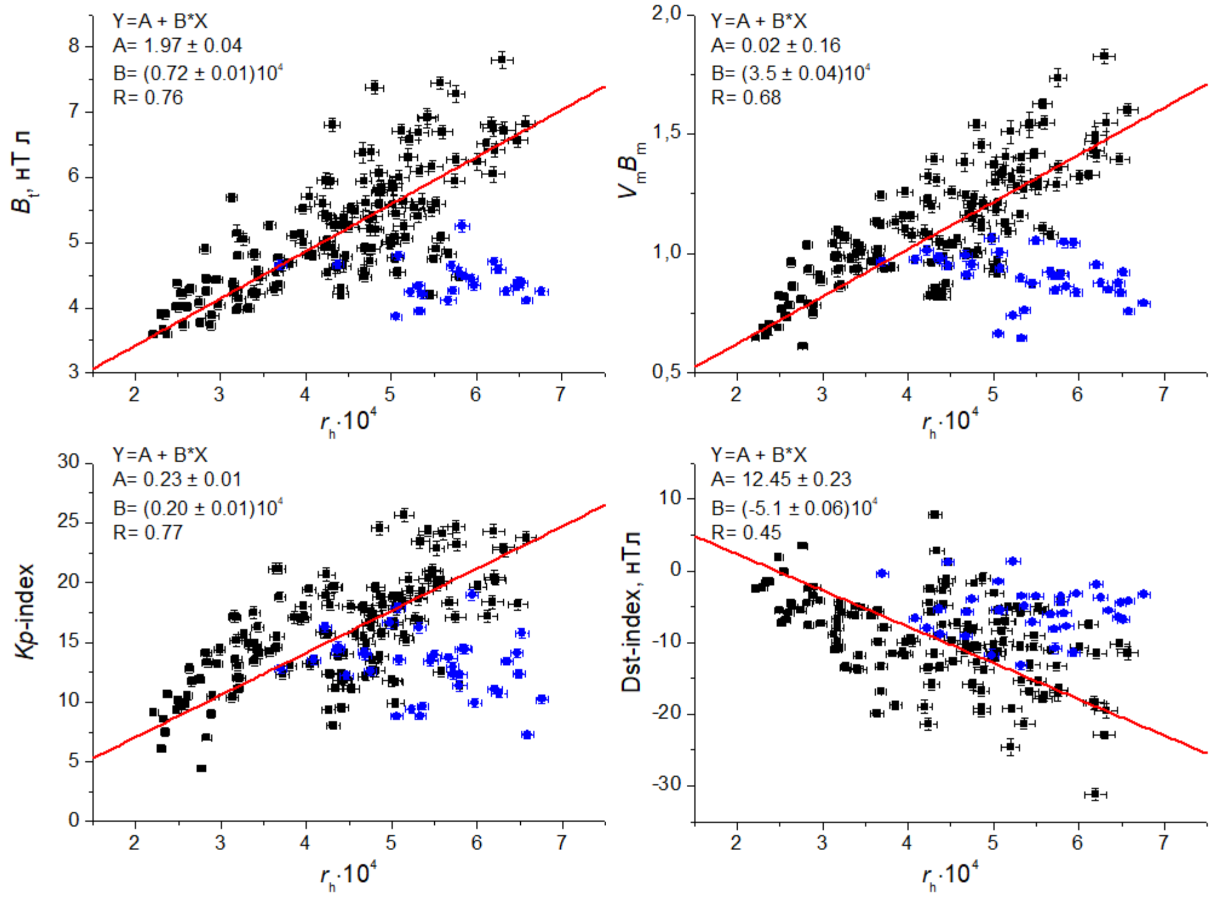


Рисунок 2.18. Зависимости между среднемесячными значениями r_h, среднемесячными значениями параметров межпланетного магнитного поля и индексами геомагнитной активности за 2007 – 2020 гг.

2.3. Основные результаты и выводы главы 2

Анализ данных о долговременных вариациях характеристик потока мюонов, полученных в 2007 – 2020 гг. на годоскопе УРАГАН, показал:

- в вариациях вектора локальной анизотропии в диапазоне зенитных углов 25° ≤ θ < 76° кроме годового присутствует полугодовой, 27-суточный и суточный ход;
- суточные вариации скорости счета и вертикальной проекции вектора локальной анизотропии A_Z подобны и синфазны, а суточные изменения вариации проекций вектора на юг A_S и восток A_E отличаются от них. Отмечено аномальное поведение среднегодовых отклонений с 2018 по 2020 гг. по сравнению с другими годами, что, возможно, связано с изменением полярности Солнца;

- отмечаются устойчивые среднегодовые суточные корреляции между горизонтальными проекциями вектора локальной анизотропии A_S и A_E, однако в 2018 – 2020 гг. наблюдается их нарушение;
- в вариациях угловых характеристик потока мюонов по данным 2007 – 2020 гг. наблюдается цикличность солнечной активности: выделяются годы спада и минимума активности (2007 – 2008 гг. и 2009 год соответственно) и годы роста и пика активности (2010 – 2011 гг. и 2012 – 2015 гг.). С 2016 года отмечается спад активности до очередного минимума в 2019 – 2020 гг.
- наилучшие корреляции среднемесячных значений проекции вектора относительной анизотропии (r_h) с 2007 по 2017 гг. со среднемесячными значениями параметров межпланетного магнитного поля и индексами геомагнитной активности наблюдаются между r_h и вектором магнитной индукции B_t (коэффициент корреляции ≈ 0.76), а также с индексом геомагнитной активности Kp (коэффициент корреляции ≈ 0.77).

В результате сопоставления данных двух нейтронных мониторов в Москве (MOSC) и Апатитах (APTY) с данными мюонного годоскопа УРАГАН в период с 2008 по 2020 гг. были получены:

- коэффициенты корреляции между нормированными скоростями счета, а также между темпами их изменения за один час нейтронных мониторов и МГ УРАГАН и исследовано их временное поведение;
- среднегодовые суточные отклонения для каждого детектора отдельно по годам и отношения суточного размаха МГ УРАГАН к MOSC и УРАГАН к APTY, которые показали, что наблюдается аномальное поведение отношения суточных размахов скорости счета в 2019 – 2020 гг.;
- коэффициенты корреляции между суточными среднеквадратичными отклонениями МГ УРАГАН и MOSC, а также МГ УРАГАН и APTY, усредненными по месяцам, которые оказались в полтора раза выше, чем коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями скорости счета;
- коэффициенты корреляций усредненных по месяцам суточных среднеквадратичных отклонений данных МГ УРАГАН и MOSC с параметрами солнечного ветра, геомагнитными индексами и ММП, которые слабо отличаются, несмотря на более высокие энергии первичных частиц, генерирующих мюоны.

ГЛАВА 3. МЮОНОГРАФИЯ СОБЫТИЙ ТИПА GLE

События GLE (Ground level enhancement) связаны с крупными солнечными вспышками и проявляются как внезапное увеличение интенсивности космических лучей. Такие события являются достаточно редкими. На текущий момент зарегистрировано более 70 событий, первое из которых наблюдалось 28 февраля 1942 года, а последние (70, 71 и 72) были зарегистрированы соответственно в 2006, в 2012 и в 2017 годах [99, 100].

Вспышки на Солнце оказывают влияние на магнитосферу и атмосферу Земли и, как следствие, на работу высокотехнологичных систем на Земле и в космосе. Этим и определяется важность их изучения. Во время таких вспышек возникает корпускулярное солнечное излучение, энергетический диапазон которого составляет от нескольких МэВ до единиц ГэВ, а при мощных вспышках наблюдаются солнечные протоны с энергиями до 30-40 ГэВ [101]. При таких мощных событиях возникают выбросы солнечных релятивистских заряженных частиц, регистрируемых на поверхности Земли как возрастание потока космических лучей – GLE [102]. Такие события регистрируются, когда происходит близкое по времени статистически значимое увеличение скорости счета не менее чем в двух находящихся в разных местах нейтронных мониторах и по крайней мере в одном нейтронном мониторе, расположенном вблизи уровня моря, с соответствующим повышением в потоке протонов, измеренном на одном или более спутниках. Другой подкласс событий sub-GLE [102], соответственно, регистрируется, когда имеется близкое по времени, статистически значимое увеличение скорости счёта не менее чем в двух находящихся в разных местах высотных нейтронных мониторах с соответствующим повышением в потоке SEP (Solar Energetic Particles), измеренном на одном или более спутниках, но при этом не наблюдается статистически значимое повышение в скорости счёта нейтронных мониторов, расположенных вблизи уровня моря [103].

GLE изучаются по данным детекторов космических лучей, регистрируемых как в потоке нейтронов, так и в потоке мюонов с использованием различных методов. Особый интерес представляет исследование динамики потока космических лучей, которую можно получить, зарегистрировав поток мюонов на поверхности Земли, в том числе в годоскопическом режиме. Информация об угловом распределении солнечных протонов может быть получена из измерений потока мюонов на поверхности Земли. Анализ потока мюонов дает возможность изучать поток солнечных частиц при энергиях в десятки ГэВ.

В период экспериментальных измерений, проводимых на мюонном годоскопе УРАГАН, по данным нейтронных мониторов и в результате спутниковых измерений были зарегистрированы следующие события GLE:

- GLE#70 13 декабря 2006 года;
- GLE#71 17 мая 2012 года;
- GLE#72 10 сентября 2017 года;
- sub-GLE, датируемое 27 января и 7 марта 2012 года, 6 января 2014 года, 7 июня и 29 октября 2015 года, 26 августа 2018 года.

Первое событие, которое было зарегистрировано в годоскопическом режиме МГ УРАГАН, – событие GLE#70. При анализе данного события были разработаны основные подходы к исследованию подобных событий с помощью мюонографий [104].

3.1. Результаты анализа данных МГ УРАГАН во время GLE#70

13 декабря в 02:26 UTC произошла вспышка на Солнце, сопровождавшаяся мощным солнечным протонным событием GLE#70, которое вызвало резкий рост потока космических лучей как в околоземном пространстве (рисунок 3.1),так и на уровне Земли (рисунок 3.2).

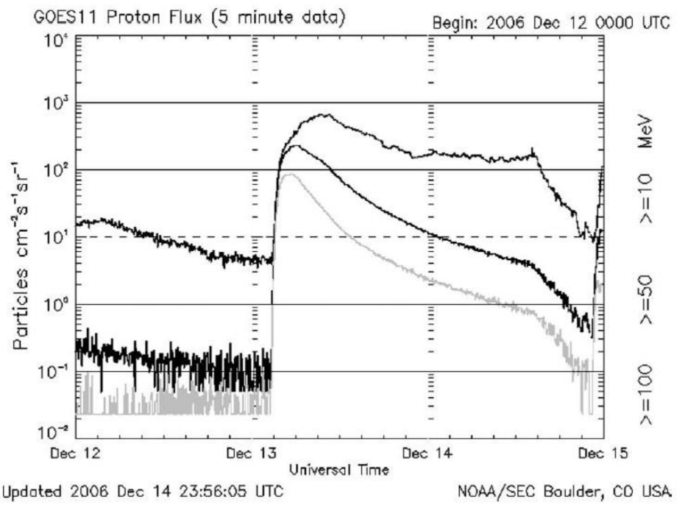


Рисунок 3.1. Увеличение интенсивности протонов для разных энергетических порогов после вспышки X3.4/4B, произошедшей 13 декабря 2006 года. Данные космического аппарата GOES11 (NOAA) [105]

Это событие зарегистрировано сетью нейтронных мониторов [106, 107]. Различие профилей нарастания скоростей счета нейтронов на четырех нейтронных мониторах вызвано прежде всего большой анизотропией релятивистского потока солнечных протонов. Наибольший рост зафиксирован на станциях Оулу и Апатиты. Меньший рост наблюдался в Москве из-за более высокого геомагнитного обрезания. Все три станции смотрели почти вдоль оси анизотропии. Иркутский нейтронный монитор зарегистрировал небольшое увеличение интенсивности КЛ с задержкой начала GLE из-за неблагоприятного акцептного направления [108].

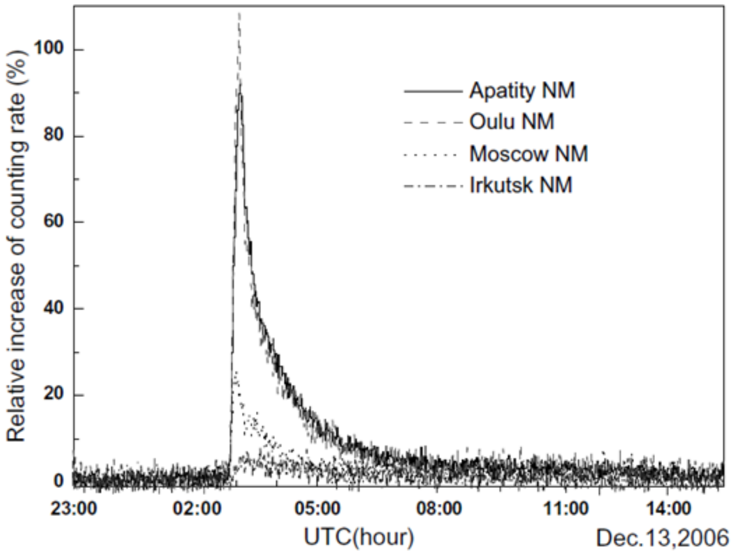


Рисунок 3.2. Событие GLE#70 в одноминутных данных ряда нейтронных мониторов (Апатиты, Оулу, Москва, Иркутск). Данные из базы данных ИЗМИРАН [104, 109]

В декабре 2006 года работало только два супермодуля (СМ3 и СМ4) мюонного годоскопа УРАГАН. Общая площадь установки на тот момент составляла 23 м^2, тем не менее суммарная скорость счета реконструированных мюонных треков в обоих супермодулях для минутного интервала времени обеспечила статистическую точность на уровне 0.25%.

На рисунке 3.3 представлены одно- и десятиминутные данные скорости счета мюонного годоскопа УРАГАН, которые показывают рост интенсивности потока мюонов космических лучей, начиная с 02:54 UTC (см. рисунок 3.3 вверху). Максимальное увеличение наблюдалось в 02:59 UTC для SM3 и в 03:01 UTC для SM4. Увеличение одноминутных данных отдельных супермодулей составило примерно 3 стандартных отклонения. Однако при суммировании 10-минутной скорости счета по супермодулям МГ УРАГАН максимальное значение увеличения составило (0.61 ± 0.09)% на 03:00 UTC, что превышает уровень шести стандартных отклонений (рисунок 3.3 внизу).

Жесткости первичных солнечных протонов, которые дали вторичные мюоны, зарегистрированные МГ УРАГАН, можно оценить с помощью функций отклика мюонного годоскопа и спектров солнечных протонов. Существует несколько оценок формы энергетического спектра солнечных протонов [108]. Для степенной зависимости $\sim E^{-5.5}$

расчеты дают среднюю жесткость около 7 ГВ. Оценка средней жесткости для экспоненциальных спектров солнечных протонов ~exp (–*E*/0.33 ГэВ) дает более низкое значение медианной жесткости (около 3 ГВ).

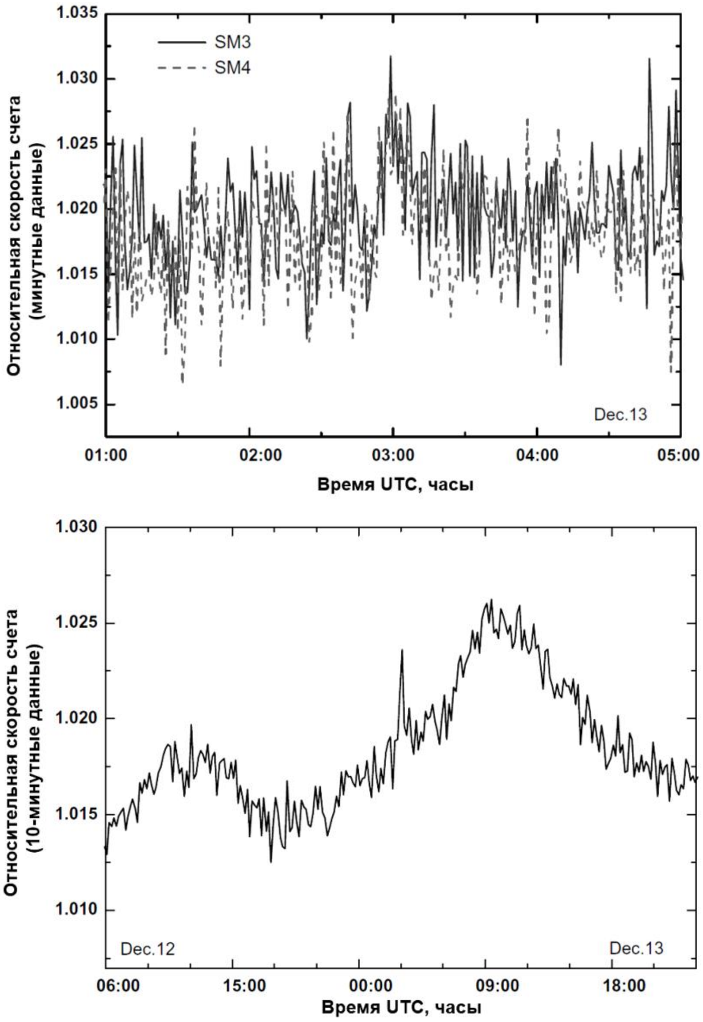


Рисунок 3.3.Скорость счета мюонного годоскопа УРАГАН, зафиксированная 13 декабря 2006 года. Сверху – минутные данные отдельных супермодулей, снизу – суммарные десятиминутные данные [104]

При анализе этого GLE впервые были использованы мюонографии, которые позволяют анализировать пространственно-угловые характеристики потока мюонов. На рисунке 3.4 представлена последовательность мюонографий отдельно для СМ3 и СМ4 мюонного годоскопа с 4-минутным временным сдвигом, полученных с использованием среднего значения за 5-минутные интервалы. Цветовые шкалы показывают избыток или недостаток мюонов в единицах стандартных отклонений. Время начала (UTC) каждого интервала усреднения указано слева. Рассмотрение мюонографий отдельно для независимых СМ3 и СМ4, с одной стороны, уменьшает статистическую обеспеченность, с другой стороны, позволяет повысить достоверность получаемых мюонографий.

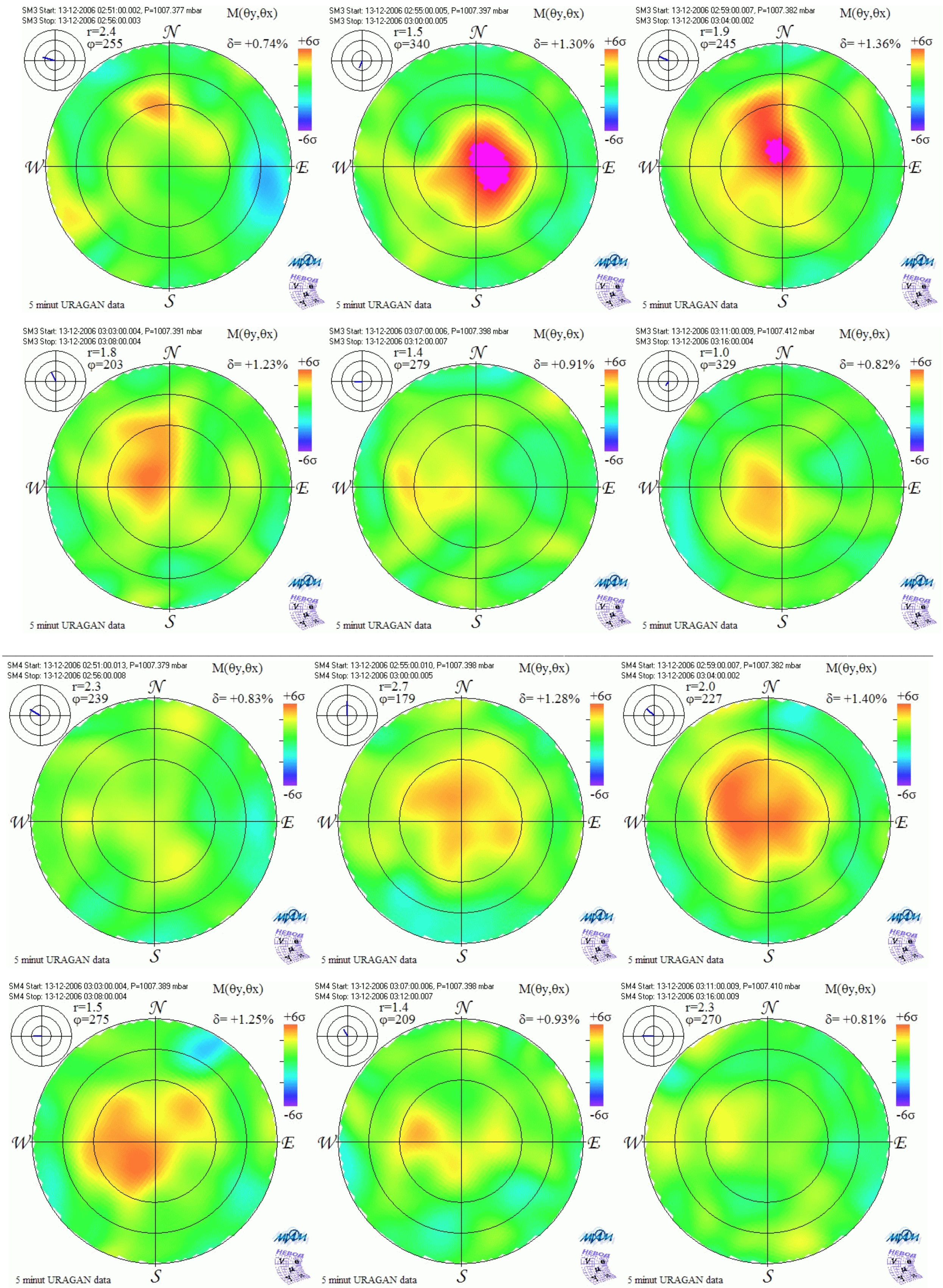


Рисунок 3.4. Последовательность мюонографий потока мюонов в лабораторной системе во время протекания события GLE, зарегистрированного 13 декабря 2006 года, по данным супермодулей СМ3 (1 и 2 ряды рисунков), СМ4 (3 и 4 ряды рисунков) мюонного годоскопа УРАГАН

Как видно на рисунке 3.4, мюонографии наглядно демонстрируют угловое распределение при увеличении потока мюонов в лабораторной системе. На изображениях хорошо видно, что мюонный годоскоп УРАГАН регистрировал GLE-эффект в течение 10 минут в достаточно узком угловом интервале с центром вблизи вертикального направления. Угловой радиус пятна увеличения потока мюонов составляет ~ 15–20°.

Особый интерес представляет изучение этого события в системе GSE. На рисунке 3.5 представлены последовательности мюонографий, полученных с использованием среднего значения за 5-минутные интервалы, в GSE-системе для СМ3 и СМ4 мюонного годоскопа с 4-минутным временным сдвигом. Из мюонографий в системе GSE хорошо видно, что максимальный поток мюонов наблюдается в направлении силовой линии магнитного поля, на которое в утреннее время был направлен конус приема мюонного годоскопа.

Для проверки разработанных подходов проведено сравнение данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными нейтронных мониторов во время GLE#70. Используя рассчитанные асимптотические конусы прилета и решая обратную задачу, можно получить характеристики первичных солнечных протонов вне атмосферы и магнитосферы по данным всемирной сети нейтронных мониторов [108, 110]. Этот вид анализа включает несколько этапов:

- определение асимптотических конусов приема станций нейтронных мониторов (с учетом не только вертикального, но и наклонного прихода падающих частиц). Траектории частиц рассчитываются с использованием модели магнитосферы Цыганенко, 2001 [111];
- расчет откликов НМ для различных параметров потока первичных солнечных протонов;
- применение метода наименьших квадратов для определения параметров первичных солнечных протонов, а именно: энергетического спектра, направления оси анизотропии и питч-углового распределения – вне магнитосферы посредством сравнения вычисленных откликов наземного детектора с данными наблюдений.

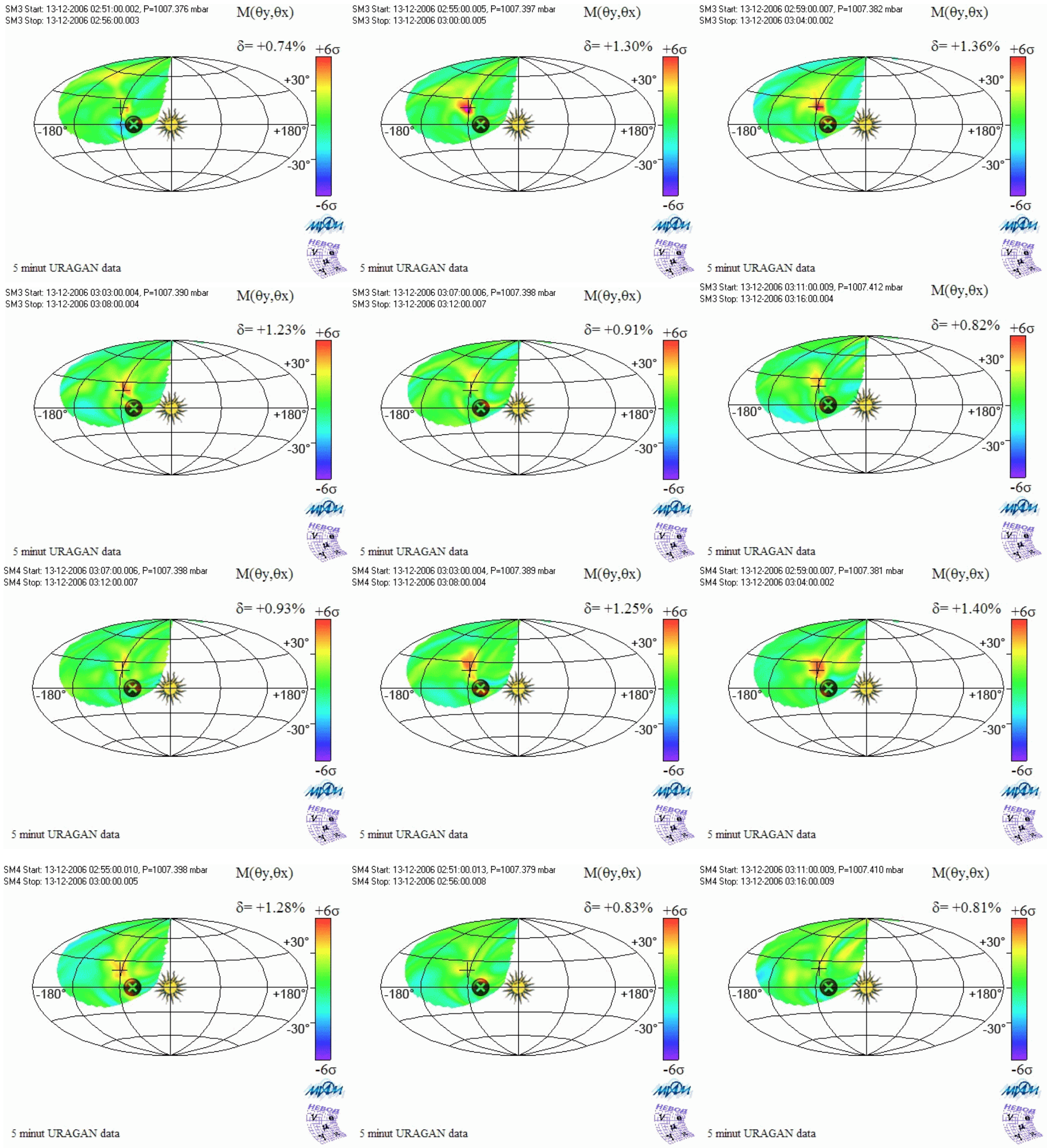


Рисунок 3.5. Последовательность мюонографий потока мюонов в системе GSE во время события GLE, зафиксированного 13 декабря 2006 года, по данным супермодулей СМ3 (1 и 2 ряды рисунков), СМ4 (3 и 4 ряды рисунков) мюонного годоскопа УРАГАН

На рисунке 3.6 показана карта направлений в гелиоцентрической системе координат солнечной эклиптики (GSE). Сплошным крестиком обозначено направление оси анизотропии, полученное из данных всемирной сети нейтронных мониторов (36 станций) для потока солнечных протонов в 03:00 UTC. Направление близко к направлению межпланетного магнитного поля (обозначено звездочкой) по данным ACE [112]. Сетка пинч-угла (относительно оси анизотропии) обозначена тонкими кружками. Числа на кружках – значения угла наклона.

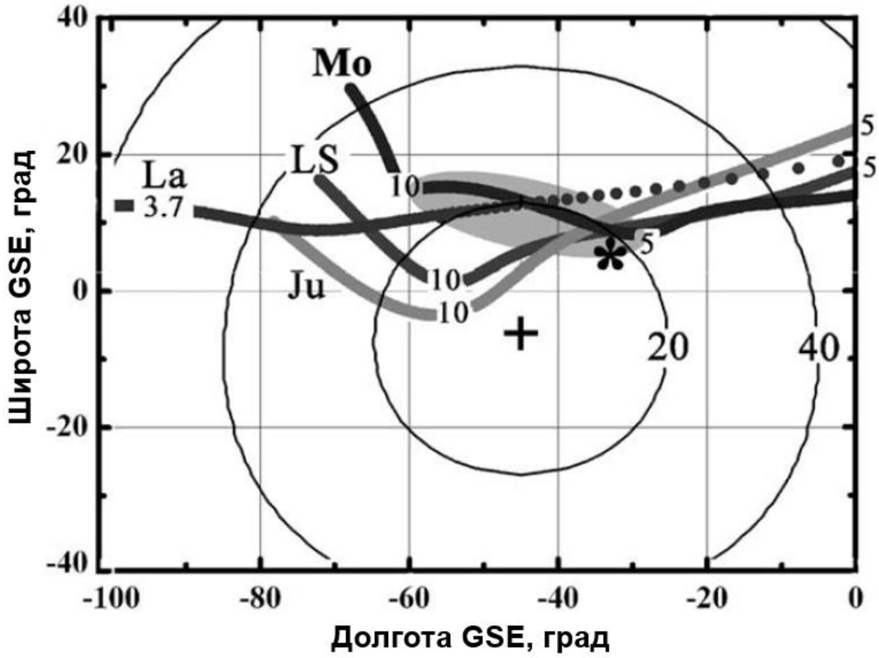


Рисунок 3.6. Асимптотические конусы нескольких станций нейтронных мониторов (Mo – Москва, LS – Lomnitsky Stit, La – Larc, Ju – Jungfraujoch) – толстые пунктирные линии с номерами жесткостей в ГВ и проекция магнитопаузы области повышения потока мюонов (см. рисунок 3.4) – затененный эллипс. Сплошной крест и звездочка обозначают направление оси анизотропии потока солнечных протонов в 03:00 UTC и направление ММП, измеренное ACE соответственно [104]

На рисунке 3.6 показаны асимптотические конусы нескольких станций НМ с геомагнитным обрезанием от 2.4 ГВ в Москве до 4.5 ГВ в Юнгфрауйох [113] как толстые пунктирные линии со значениями жесткостей в ГВ. Параметры этих нейтронных мониторов можно найти в [92, 109, 114]. Каждая точка асимптотического конуса соответствует направлению прибытия протона с заданной жесткостью (который затем достигает атмосферы над данной станцией) к границе магнитосферы (магнитопаузе).

Эллипс на рисунке 3.6 представляет собой проекцию на магнитопаузу кругового конуса направлений, сформированного частицами, образующими область увеличения в конусе приема мюонного годоскопа. Радиус области (рисунок 3.4) принят равным 20°. При проецировании области на границу магнитосферы жесткость принималась равной 5 ГВ. Само проецирование проводилось с помощью расчетов траектории частицы с массой протона (но с отрицательным зарядом), запущенной с высоты 20 км над годоскопом под соответствующими углами. Видно достаточно хорошее согласие между конусом акцептирования анизотропного сгустка на мюонографиях (как в лабораторной системе координат, так и в системе GSE) и асимптотическими направлениями прихода частиц, вызвавших рост скорости счета нейтронных мониторов, смотрящих примерно в направлении межпланетного магнитного поля [104].

Таким образом, протонное событие 13 декабря 2006 года зарегистрировано не только спутниковыми детекторами и нейтронными мониторами на высоких и умеренных геомагнитных широтах, но и наземным мюонным годоскопом УРАГАН. Момент максимума по данным УРАГАН приходится на 03:00 UTC, что совпадает с данными нейтронных мониторов. Относительное увеличение скорости счета за 10 минут составляет (0.61 ± 0.09) %. Мюонный пик на временном профиле события намного резче нейтронного с продолжительностью около 10 минут. Оценки медианной жесткости солнечных протонов для мюонного годоскопа УРАГАН дают значения около 5 ГВ. Важно, что в момент события асимптотическое направление прихода частиц в мюонный годоскоп УРАГАН было близко к направлению ММП и, соответственно, к рассчитанной оси анизотропии релятивистского потока солнечных протонов. Таким образом, можно сделать вывод, что годоскоп УРАГАН зарегистрировал высококоллимированный короткоживущий сгусток релятивистских солнечных протонов, а также что впервые непосредственно наблюдались мюонографии угловой динамики этого сгустка. Такие сгустки частиц обычно появляются на начальной фазе GLE и относятся к так называемой «быстрой составляющей» релятивистских солнечных протонов [115].

3.2. Результаты анализа данных МГ УРАГАН во время GLE#71 и GLE#72

С применением разработанных подходов к исследованию событий GLE по потоку мюонов космических лучей, регистрируемых в годоскопическом режиме и позволяющих изучать угловую динамику на основе мюонографий, был проанализирован отклик мюонного годоскопа на события GLE, которые произошли в конце 23-го и в 24-м солнечных циклах. GLE #71 и GLE #72 были зарегистрированы 17 мая 2012 года и 10 сентября 2017 года соответственно [100].

На рисунке 3.7 представлены 5-минутные данные нейтронных мониторов во время GLE#71. Наибольшее повышение (более 15%) потока космических лучей было зарегистрировано на мониторах SOPO (Южный полис), APTY (Апатиты, РФ) и OULU (Оулу, Финляндия) [116].

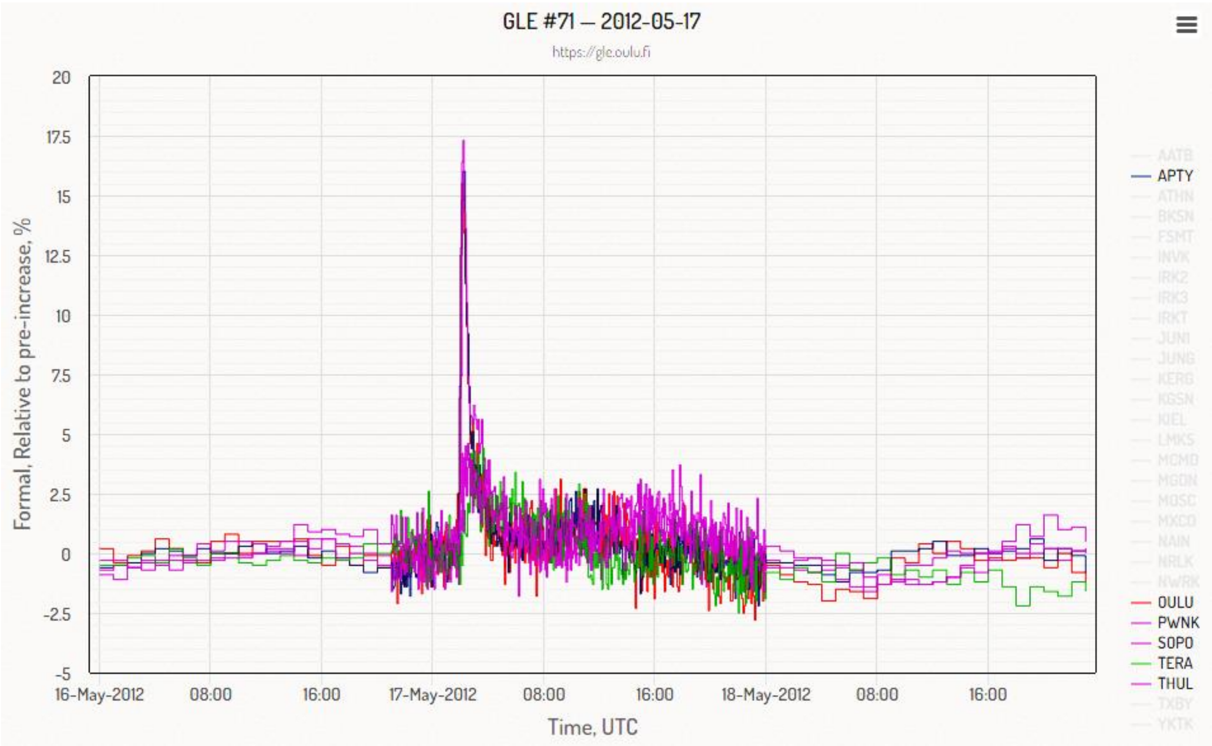


Рисунок 3.7. Пятиминутные данные скорости счёта нейтронных мониторов во время события GLE #71, зарегистрированного 17 мая 2012 года [116]

Событие началось в 01:54 UTC (по данным нейтронного монитора в Оулу), достигнув максимальной амплитуды в 18% в 02:08 UTC на той же станции. Согласно максимальным значениям увеличения потока нейтронов, зарегистрированным станциями, событие длилось около часа.

На рисунке 3.8 представлены 5-минутные данные МГ УРАГАН за сутки с 17.05.2012 00:00 UTC по 18.05.2012 00:00 UTC. На рисунках видно, что в скорости счёта мюонов событие GLE #71 по данным мюонного годоскопа УРАГАН не наблюдается.

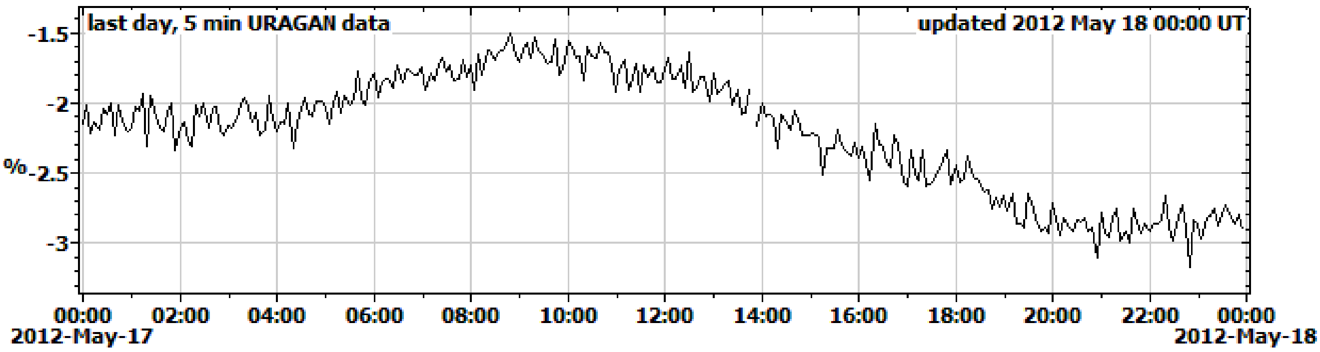


Рисунок 3.8. Пятиминутные данные скорости счёта МГ УРАГАН во время события GLE#71, зарегистрированного 17 мая 2012 года, за сутки (с 17.05.2012 00:00 UTC по 18.05.2012 00:00 UTC)

На рисунке 3.9 приводятся мюонографии за 5-минутные интервалы времени по матричным данным МГ УРАГАН в моменты времени 02:05 UTC, 02:10 UTC, 02:15 UTC. Из рисунков также следует, что существенных особенностей в потоке мюонов не наблюдается.

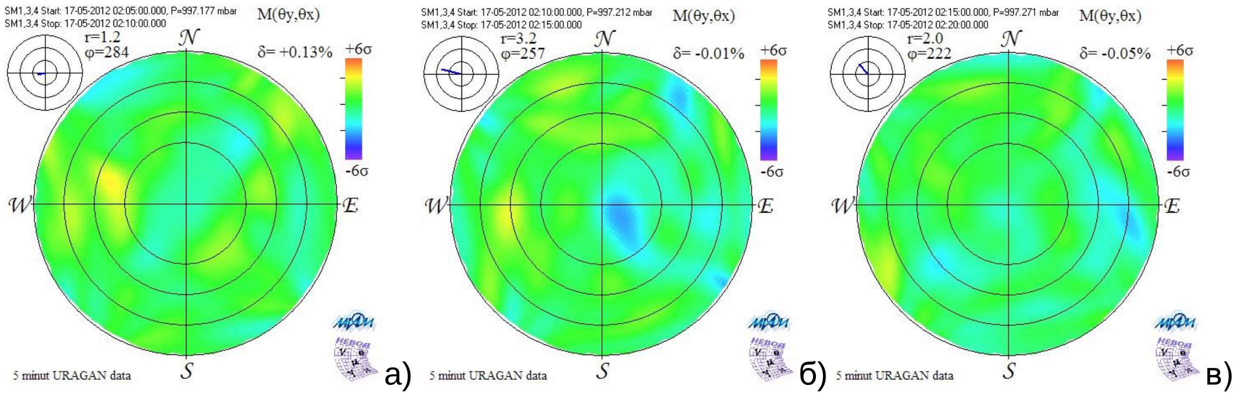


Рисунок 3.9. Мюонографии по пятиминутным данным МГ УРАГАН в локальной системе координат: а) 17.05.2012, 02:05 UTC; б) 17.05.2012, 02:10 UTC; в) 17.05.2012, 02:15 UTC

На рисунке 3.10 представлены соответствующие мюонографии в системе GSE. Как видно на рисунке, в системе GSE по асимптотическим направлениям протонов солнечных энергий (зависимость кинетической энергии протона от зенитного угла мюона: E_p[ГэВ]=$12.577\cdot(\cos\theta)^{-1.04462}$) в 02:10 UTC около направления силовой линии (на рисунке обозначен косым крестом) наблюдается некоторое повышение скорости счёта по сравнению с моментами, приходящимися по времени на 02:05 UTC и 02:15 UTC. Таким образом, можно сделать вывод, что событие GLE #71 на МГ УРАГАН могло наблюдаться, но весьма слабо.

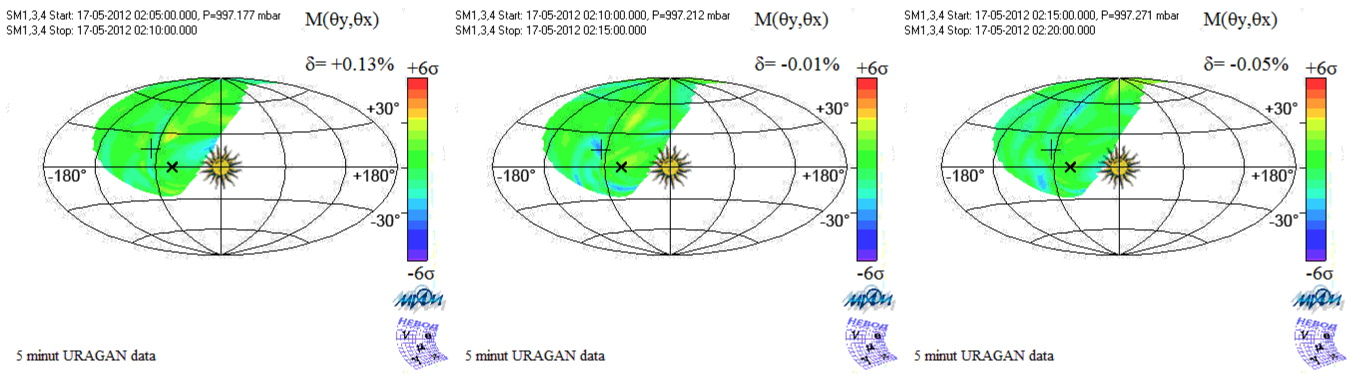


Рисунок 3.10. Мюонографии по пятиминутным данным МГ УРАГАН в GSE-системе по асимптотическим направлениям протонов солнечных энергий: г), д), е) 17.05.2012, 02:05 – 02:15 UTC

На рисунке 3.11 представлены данные нейтронных мониторов во время события GLE #72, которое произошло 10 сентября 2017 года после солнечной вспышки X8.2. Наибольшее повышение потока космических лучей было зарегистрировано на мониторах, расположенных в Антарктиде – ~10 %, на мониторах DOMB и DOMC – ~7%, на мониторе SOPB – ~5%, на мониторах JBGO и TERA, а также на мониторах THUL в Гренландии – ~5% и мониторах FSMT в Канаде – ~6% [116]. Начало события GLE наблюдалось в 16:15 UTC (например, FSMT). Наиболее различимый сигнал на нейтронных мониторах наблюдался в 16:30 UTC [117, 118]. Максимум приходится на 17:15 UTC. Данные нейтронных мониторов позволяют утверждать, что это событие имеет протяжённый характер (до 11.09.2017 года ориентировочно до 08:00 UTC).

На рисунке 3.12 представлены данные мюонного годоскопа УРАГАН с 12:00 UTC 10.09.2017 до 12:00 UTC 11.09.2017. В этот период наблюдаются два коротких всплеска в скорости счёта, а именно: в 17:10 UTC и 19:25 UTC. В это время асимптотические направления солнечных протонов для регистрируемых на МГ УРАГАН мюонов были очень далеки от направления магнитной силовой линии, поэтому солнечные протоны никак не могли бы дать такие всплески в общем потоке космических лучей. Это подтверждается мюонографиями, представленными на рисунках 3.13. Таким образом, событие GLE#72 на МГ УРАГАН не наблюдалось, так как область приема детектора была далеко от магнитной силовой линии, а два небольших всплеска можно объяснить обычными флуктуациями.

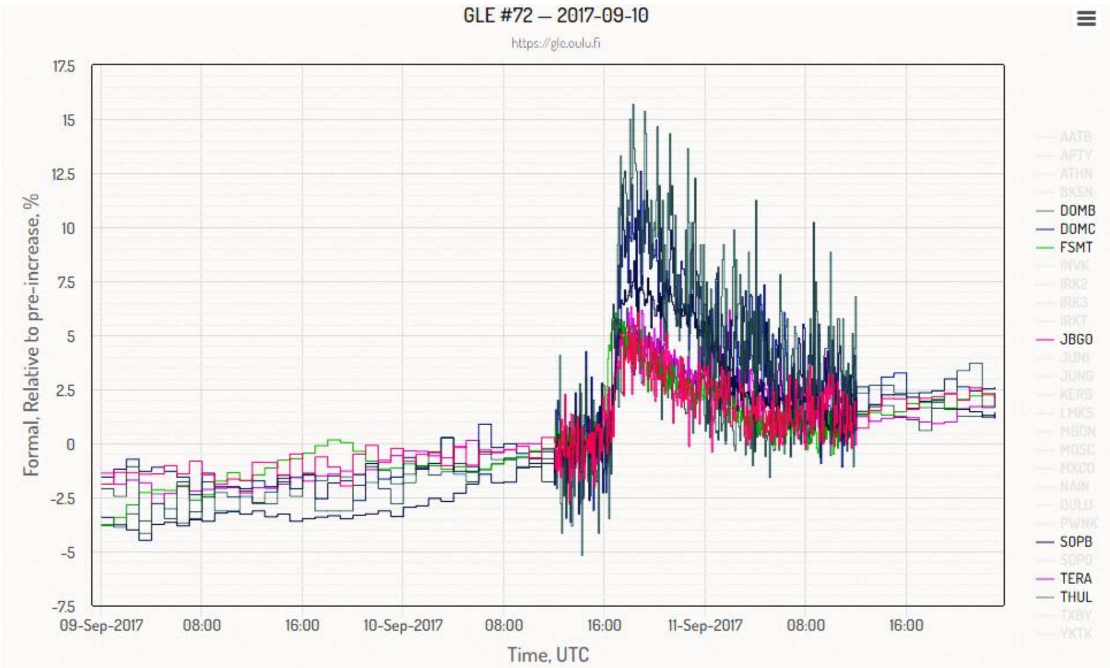


Рисунок 3.11. Пятиминутные данные скорости счёта нейтронных мониторов во время события GLE#72, зарегистрированного 10 сентября 2017 года [116]

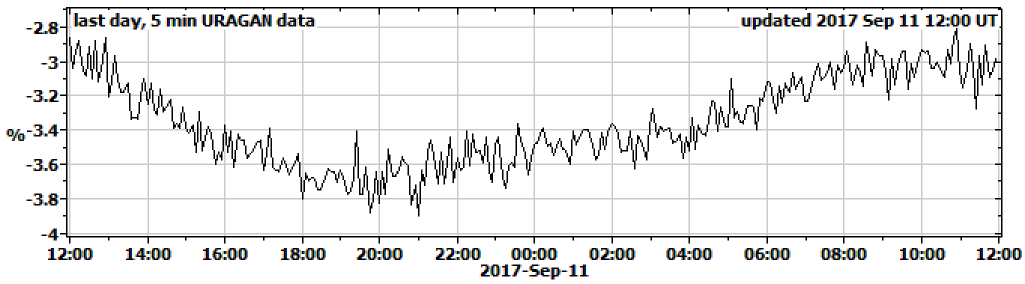
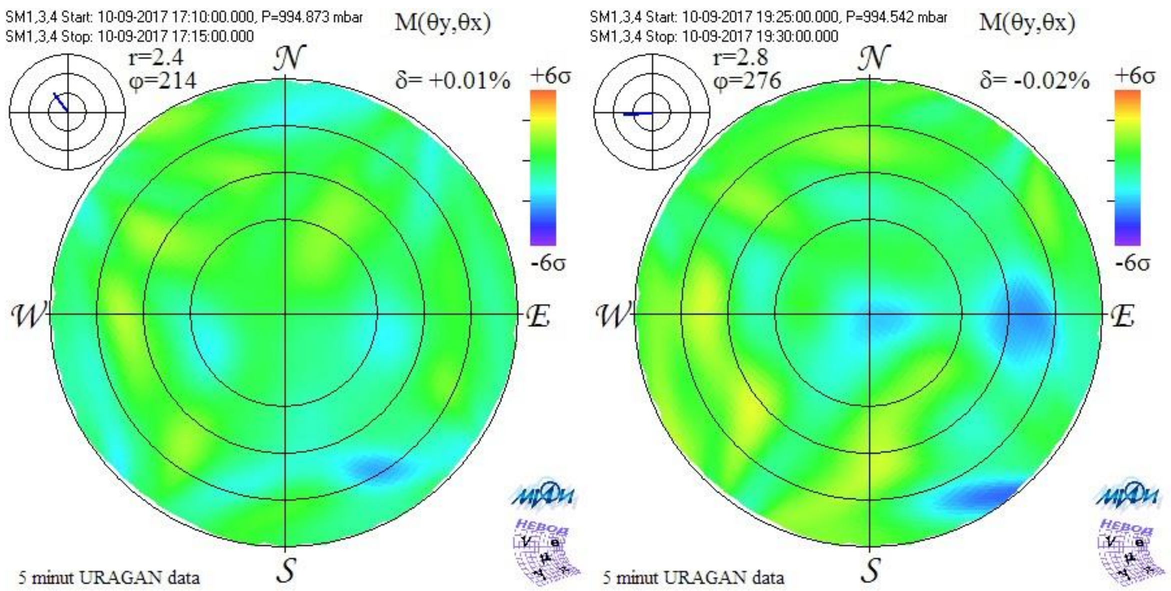
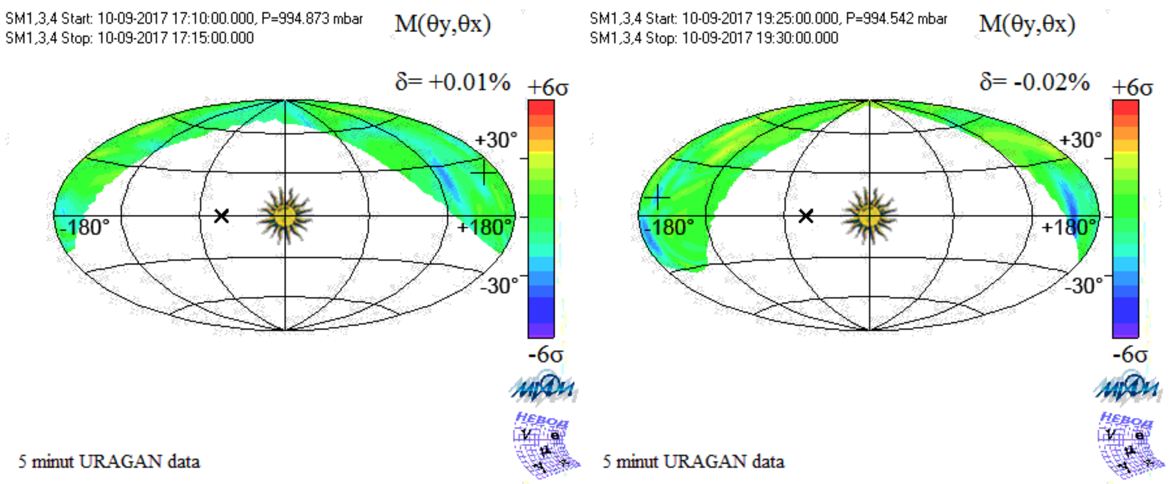


Рисунок 3.12. Пятиминутные данные скорости счёта МГ УРАГАН во время протекания события GLE#72, зарегистрированного 10 сентября 2017 года, за сутки (с 10.09.2017 12:00 UTC по 11.05.2012 12:00 UTC)



а *б*



в *г*

Рисунок 3.13. *Мюонографии по пятиминутным данным МГ УРАГАН: а) 10.09.2017, 17:10 UTC; б) 10.09.2017, 19:25 UTC; в) и г) то же, что на а) и б), но в GSE-системе по асимптотическим направлениям протонов солнечных энергий*

3.3. Результаты анализа данных МГ УРАГАН во время sub-GLE

Особый интерес представляет исследование событий типа sub-GLE, поскольку они характеризуются небольшим повышением потока протонов. По данным нейтронных мониторов скорость счёта возрастает менее чем на 10%. Обычно события sub-GLE регистрируют нейтронные мониторы, расположенные в Антарктиде (см. рисунок 3.14).

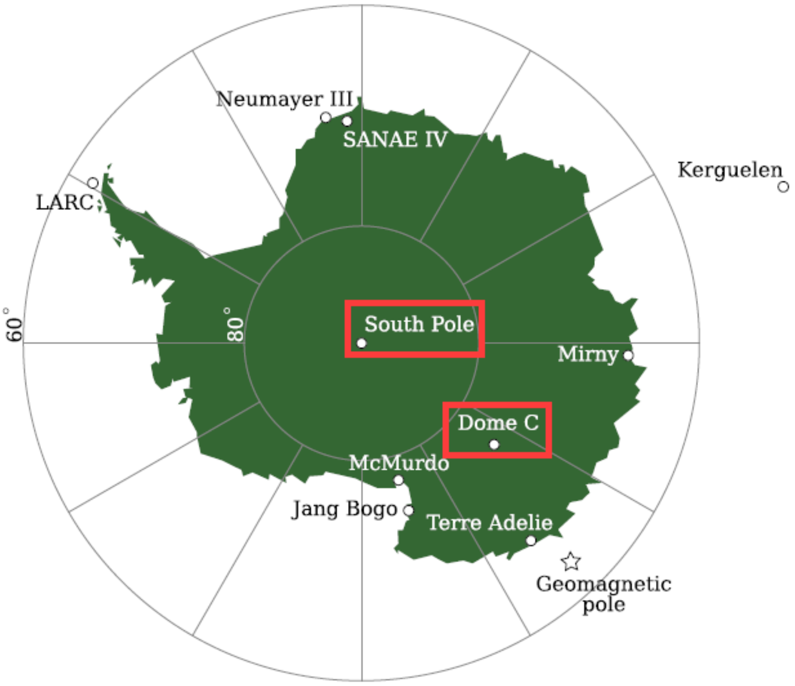
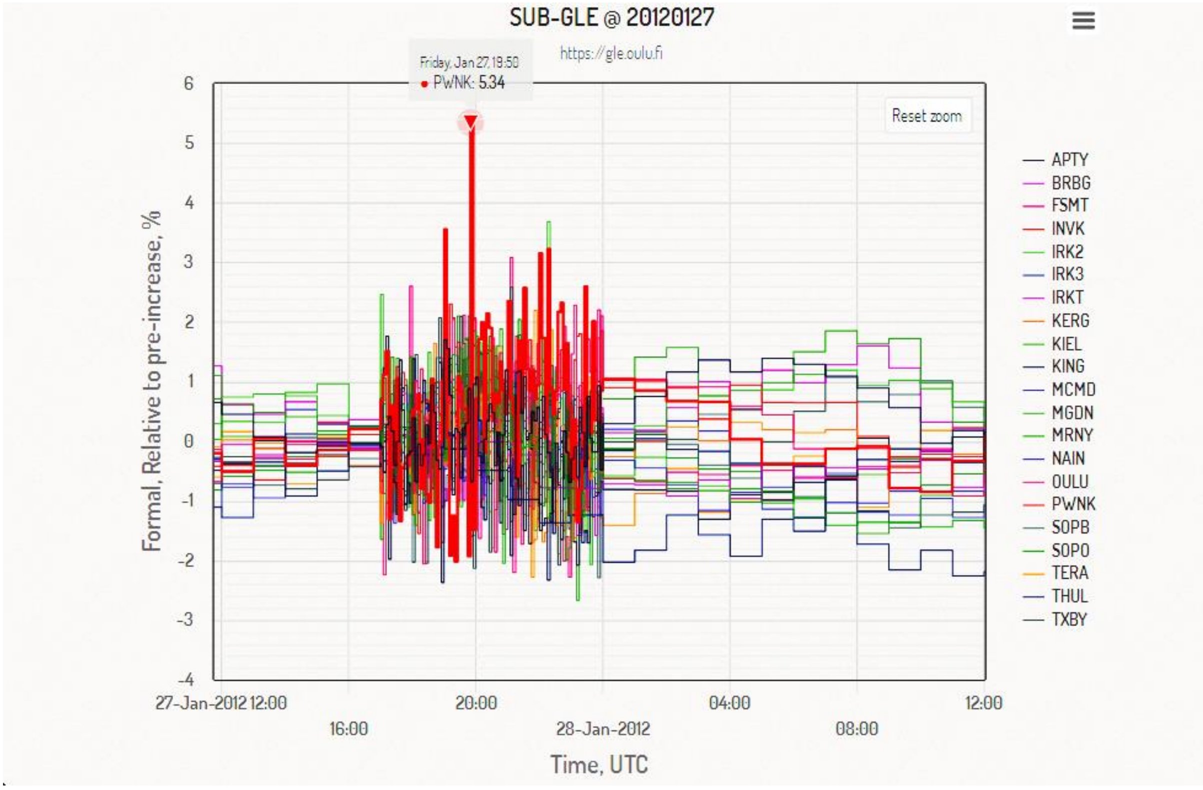


Рисунок 3.14. Антарктические станции нейтронных мониторов, работающих в 2017 году. Красным прямоугольником выделены высотные станции [102]

В период с 2012 по 2018 гг. было зафиксировано шесть событий типа sub-GLE: 27.01.2012, 07.03.2012, 06.01.2014, 07.06.2015, 29.10.2015 и 26.08.2018.

Событие sub-GLE, зарегистрированное 27.01.2012

На рисунке 3.15 представлены 5-минутные данные нейтронных мониторов и МГ УРАГАН за сутки с 27.01.2012 12:00 UTC по 28.01.2012 12:00 UTC. Сверху приводятся данные нейтронных мониторов с меткой по максимуму PWNK (Канада) в 19:50 UTC. Снизу приводятся данные МГ УРАГАН за тот же период. Исходя из времени наблюдения этого события на нейтронных мониторах, становится понятно, что на МГ УРАГАН оно не должно было быть зарегистрировано. На рисунке 3.15 никаких особенностей в 5-минутной скорости счёта МГ УРАГАН не наблюдается.



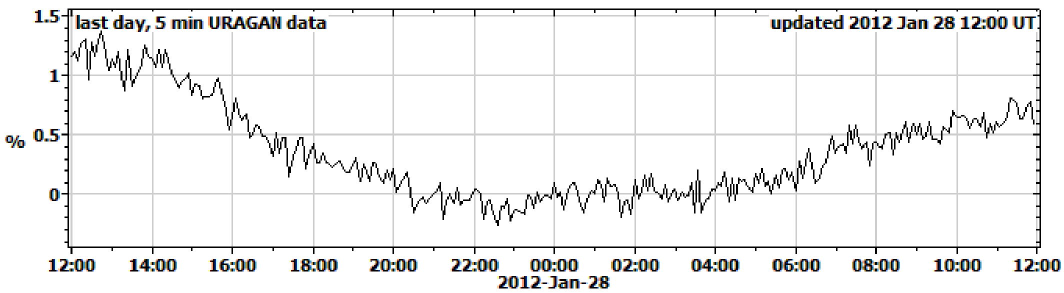


Рисунок 3.15. Пятиминутные данные скорости счёта нейтронных мониторов (сверху) и МГ УРАГАН (снизу) во время события sub-GLE, произошедшего 27.01.2012

На рисунке 3.16 представлены 5-минутные мюонографии события, произошедшего 27.01.2012, для трех моментов: 19:45 UTC, 19:50 UTC и 19:55 UTC. На рисунках видно, что событие sub-GLE, зарегистрированное 27.01.2012, по данным мюонного годоскопа УРАГАН не наблюдалось.

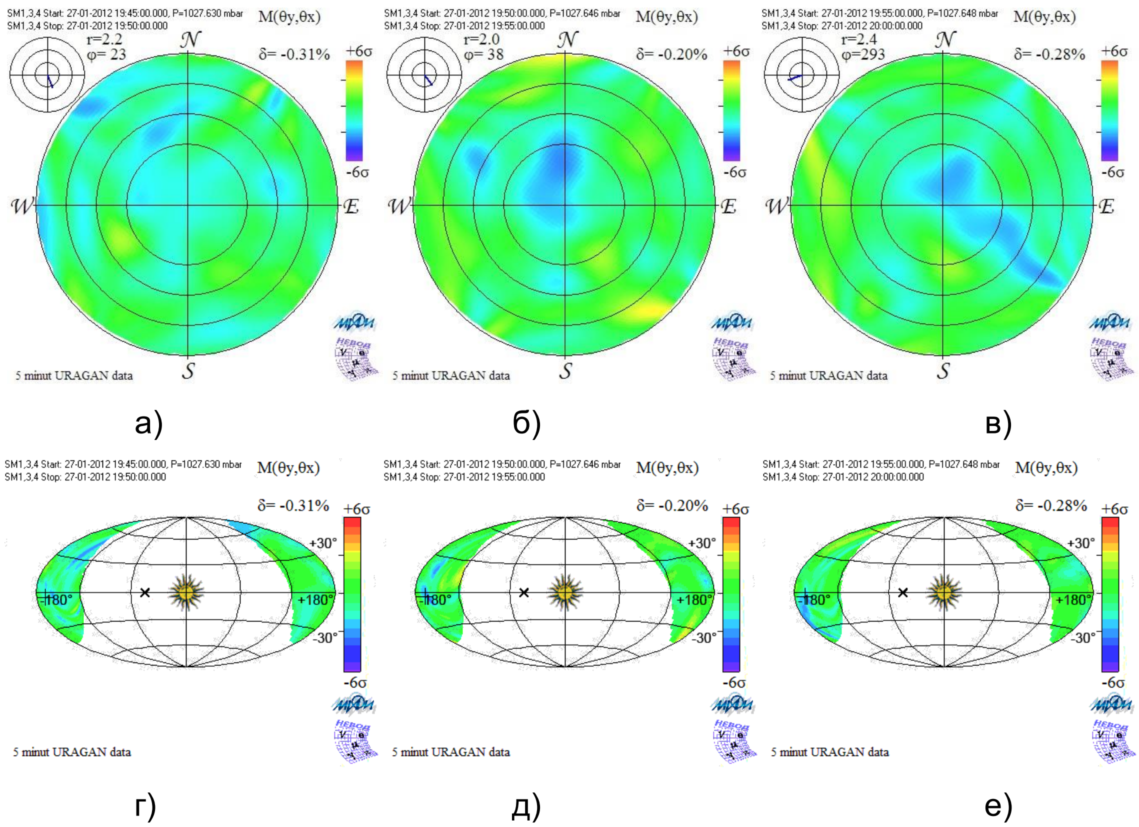


Рисунок 3.16. Мюонографии в GSE-системе по асимптотическим направлениям протонов солнечных энергий по пятиминутным данным МГ УРАГАН: а) 27.01.2012, 19:45 UTC; б) 27.01.2012, 19:50 UTC; в) 27.01.2012, 19:55 UTC; г), д), е) 27.01.2012, 19:45 – 19:55 UTC

Как видим, событие sub-GLE, произошедшее 27 января 2012 года, не наблюдалось ни при фиксации скорости счета, ни по полученным во время этого события мюонографиям.

Событие sub-GLE, зарегистрированное 26.08.2018

На рисунке 3.26 представлены 5-минутные данные нейтронных мониторов и МГ УРАГАН за сутки с 26.08.2018 00:00 UTC по 27.08.2018 00:00 UTC. Сверху приводятся данные нейтронных мониторов с меткой по максимуму OULU (Финляндия) в 04:40 UTC. Снизу – данные МГ УРАГАН за тот же период. На рисунке 3.17 наблюдается возрастание на 1% скорости счёта в то же самое время, когда было зафиксировано возрастание скорости счета по нейтронным мониторам.

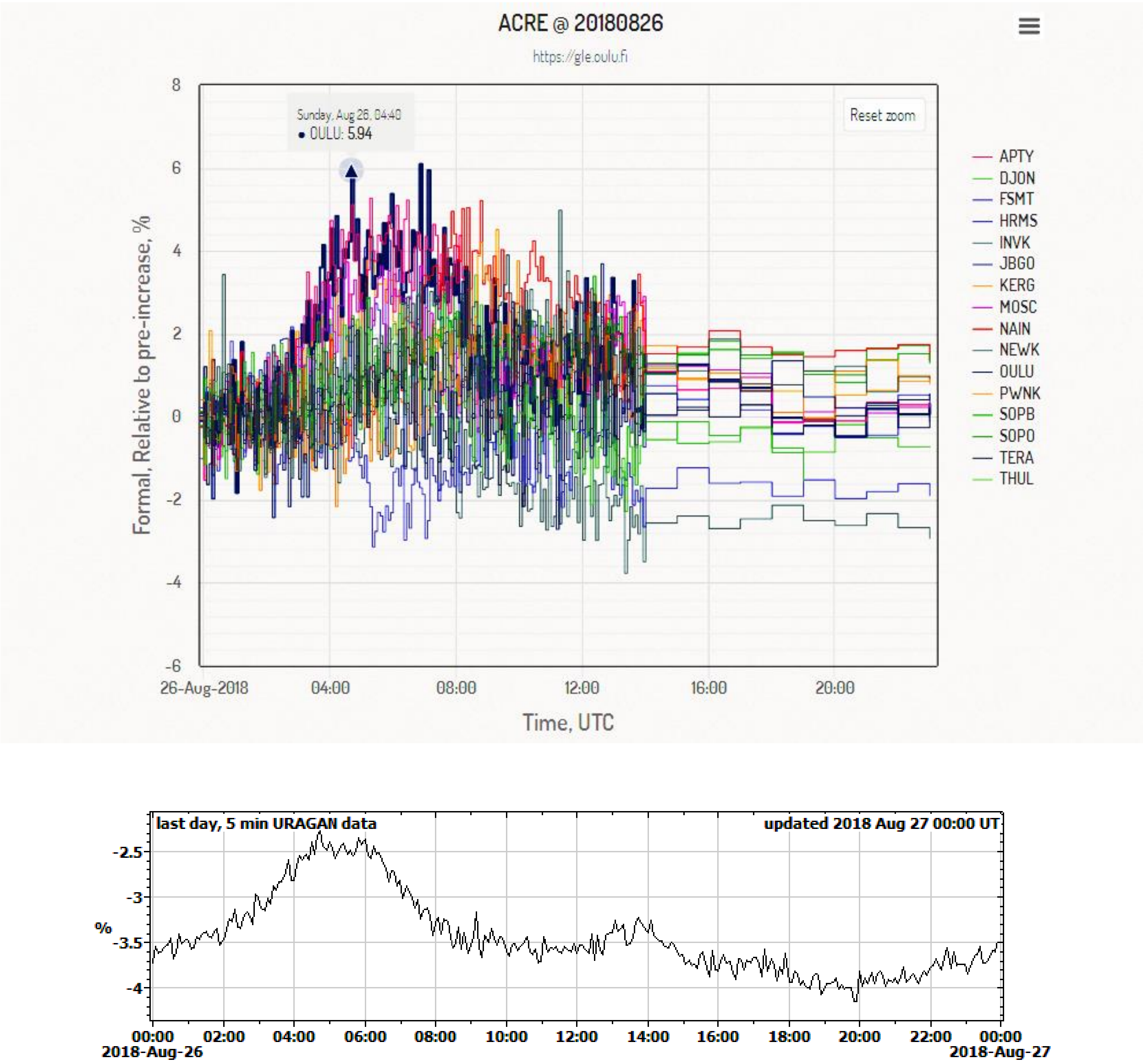
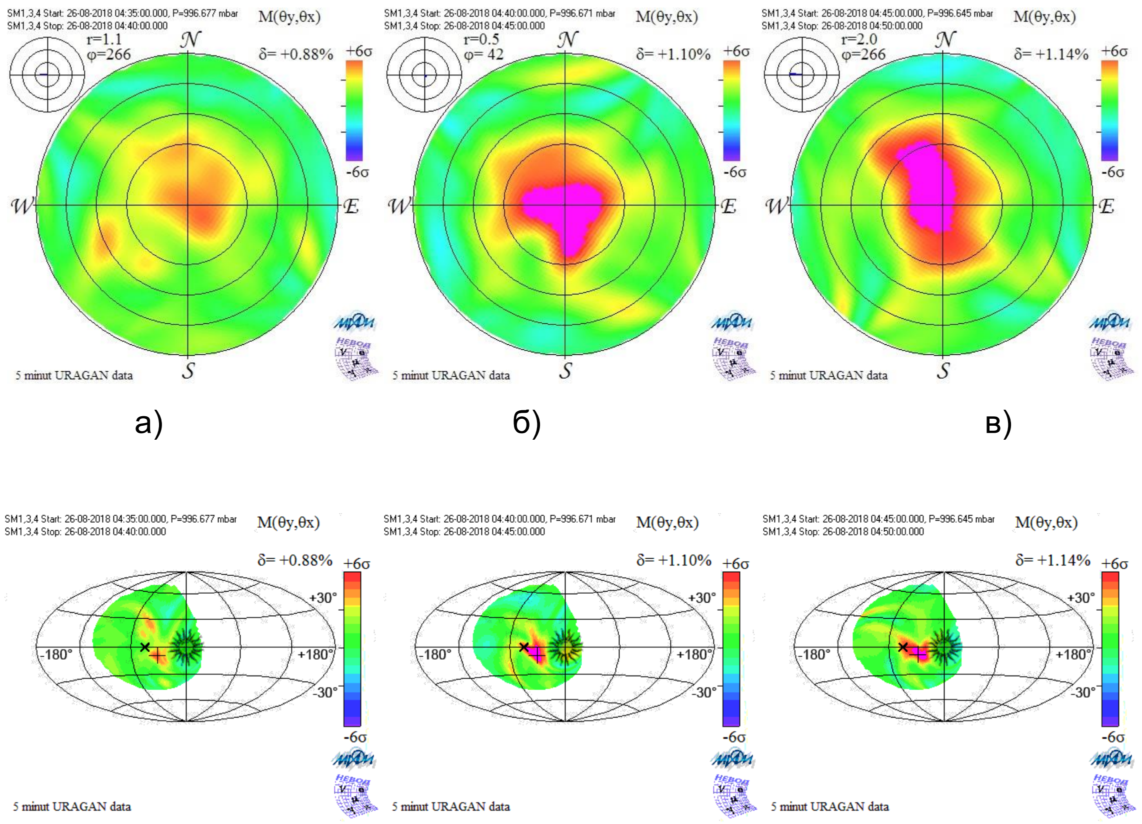


Рисунок 3.17. Пятиминутные данные скорости счёта нейтронных мониторов (сверху) и МГ УРАГАН (снизу) во время события sub-GLE, произошедшего 26.08.2018

На рисунке 3.18 представлены 5-минутные мюонографии события, зафиксированного 26.08.2018, для трех моментов: 04:35 UTC, 04:40 UTC и 04:45 UTC. На мюонографиях выделяется область локального возрастание скорости счёта МГ УРАГАН вблизи направления на магнитную силовую линию. Наблюдаемое на МГ УРАГАН возрастание скорости счёта почти синхронно с возрастанием скорости счёта на нейтронных мониторах, что свидетельствует о регистрации события sub-GLE, произошедшего 26.08.2018, мюонным годоскопом УРАГАН по мюонографиям, в том числе в GSE-системе.



а) б) в)

г) д) е)

Рисунок 3.18. *Мюонографии в GSE-системе по асимптотическим направлениям протонов солнечных энергий по пятиминутным данным МГ УРАГАН: а) 26.08.2018, 04:35 UTC; б) 26.08.2018, 04:40 UTC; в) 26.08.2018, 04:45 UTC; г), д), е) 26.08.2018, 04:35 – 02:45 UTC*

Таким образом, событие sub-GLE, произошедшее 26 августа 2018 года, было зарегистрировано как при фиксации данных скорости счета, так и на мюонографиях.

Событие sub-GLE, зарегистрированное 29.10.2015

На рисунке 3.19 представлены 5-минутные данные нейтронных мониторов и МГ УРАГАН за сутки с 28.10.2015 12:00 UTC по 29.10.2015 12:00 UTC. Сверху приводятся данные нейтронных мониторов с меткой по максимуму DOMB (Антарктида) в 02:50 UTC. Снизу приводятся данные МГ УРАГАН за тот же период. Существенных изменений в скорости счёта МГ УРАГАН не наблюдается.

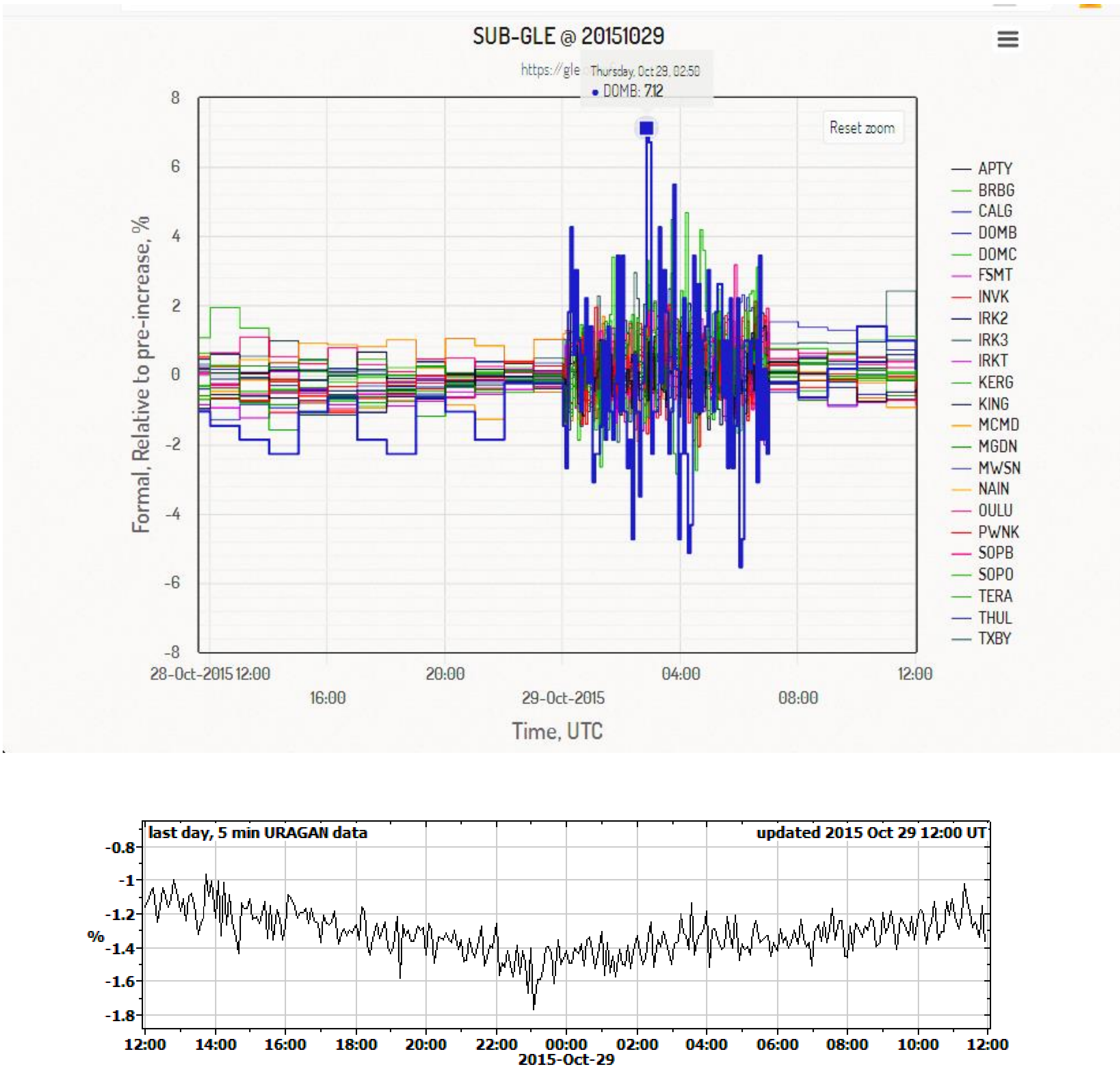


Рисунок 3.19. Пятиминутные данные скорости счёта нейтронных мониторов (сверху) и МГ УРАГАН (снизу) во время события sub-GLE, произошедшего 29.10.2015

На рисунке 3.20 представлены 5-минутные мюонографии события, произошедшего 29.10.2015, для трех моментов: 02:45 UTC, 02:50 UTC и 02:55 UTC. В мюонографиях в локальной системе координат повышение потока космических лучей не наблюдается. Однако на нижних рисунках (см. рисунок 3.25 (г, д, е)) заметна область небольшого возрастания скорости счёта (в форме полоски) вблизи направления на магнитную силовую линию. В 02:55 UTC (см. рисунок 3.25 е) область повышения сместилась вдоль меридиана на 30° ближе к северному полюсу. Таким образом, событие sub-GLE, произошедшее 29.10.2015, проявилось в виде области локального повышения скорости счёта только в мюонографиях, спроецированных в GSE-систему, т.е. в потоке первичных космических лучей.

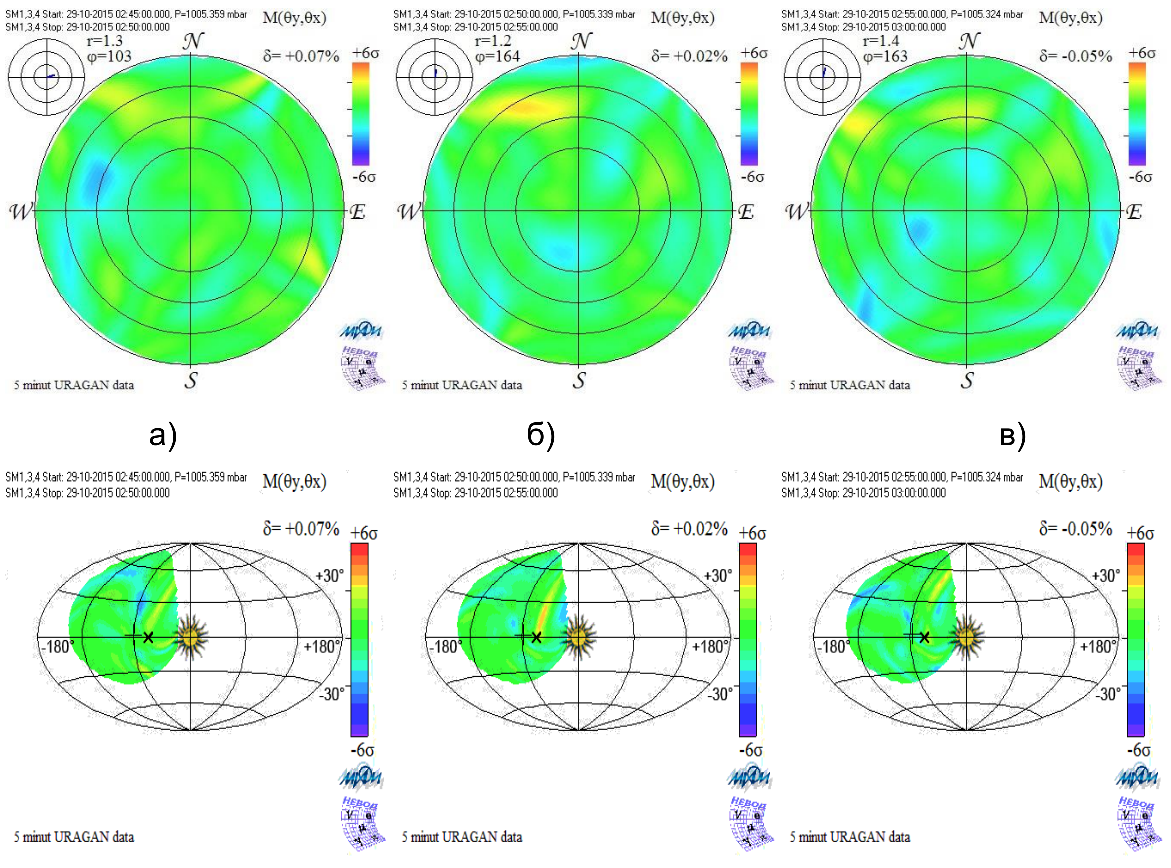


Рисунок 3.20. Мюонографии в GSE-системе по асимптотическим направлениям протонов солнечных энергий по пятиминутным данным МГ УРАГАН: а) 29.10.2015, 02:45 UTC; б) 29.10.2015, 02:50 UTC; в) 29.10.2015, 02:55 UTC; г), д), е) 29.10.2015, 02:45 – 02:55 UTC

Уникальность этого события заключается в том, что оно не зарегистрировано по данным скорости счета мюонного годоскопа, однако проявилось в мюонографиях, в частности в системе GSE.

Таким образом, можно отметить, что метод мюонографии с использованием системы координат GSE позволяет выявлять события sub-GLE, которые не проявляются в интегральных характеристиках потока мюонов космических лучей. Однако возможность регистрации событий такого класса зависит от направления апертуры мюонного годоскопа.

3.3. Основные результаты и выводы главы 3

Таким образом, на основе метода мюонографии разработаны подходы к комплексному анализу событий GLE, вызванных активными процессами на Солнце, а также получены следующие результаты:

– впервые получены мюонографии угловой динамики потока мюонов во время события GLE в локальной системе координат и в системе GSE, которые дают возможность изучать поток солнечных частиц при энергиях до десятков ГэВ;
– показано, что максимальный поток мюонов наблюдается в направлении силовой линии магнитного поля;
– впервые угловые изображения коллимированного сгустка релятивистских солнечных протонов, выброшенных из Солнца, наблюдались напрямую, тогда как ранее угловая форма таких сгустков наблюдалась косвенно с использованием сети нейтронных мониторов;
– показано, что даже небольшие возмущения потока космических лучей, так называемые события sub-GLE, которые не видны по интегральной скорости счета мюонов, могут быть выявлены с помощью мюонографий, особенно пересчитанных в систему GSE;
– продемонстрировано, что необходимым условием регистрации GLE является совпадение направления конуса приема мюонного годоскопа с направлением магнитной силовой линии или их близость.

ГЛАВА 4. МЮОНОГРАФИЯ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ

Резкие изменения вариаций потока космических лучей, которые проявляются в его падении, так называемые форбуш-эффекты, наиболее наглядно показывают влияние солнечной активности на интенсивность космических лучей, регистрируемых на поверхности Земли. Впервые резкие понижения были обнаружены американским физиком С. Форбушем [28] во время геомагнитных возмущений в 1937 году. Авторами работы [30] было дано более общее определение этому эффекту – изменение плотности и анизотропии космических лучей во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Такие события являются достаточно частыми, особенно в периоды максимума солнечной активности.

До недавнего времени такие эффекты изучались с использованием данных сети нейтронных мониторов [119], в которых регистрируется большая амплитуда наблюдаемого эффекта, связанная с более низкими энергиями первичных частиц. С помощью сети нейтронных мониторов обеспечивается глобальная съемка вариаций космических лучей по всему земному шару. Однако следует отметить, что эти детекторы расположены в различных географических точках, имеют разную геомагнитную жесткость и регистрируют события в разные моменты времени.

Из-за более высоких первичных энергий амплитуда наблюдаемых эффектов в мюонной компоненте КЛ меньше. Это предъявляет более высокие требования к разрабатываемым методам их анализа [82]. Однако, что более важно, мюоны сохраняют направление движения первичных частиц. Это позволяет получать пространственно-угловые картины модуляций КЛ в околоземном пространстве и изучать их динамику в широком диапазоне зенитных и азимутальных углов. Метод мюонографии позволяет проводить такие исследования с помощью одной установки.

Исследования ФП ведутся с начала работы МГ УРАГАН, т.е. с 2007 года. Для изучения ФП в потоке мюонов на основе интегральных данных и функции связи первичного и вторичного потоков космических лучей для пяти зенитно-угловых интервалов мюонного годоскопа УРАГАН были разработаны методы исследования энергетических характеристик ФП [120, 121, 122], а на основе мюонографий – пространственно-угловых и временных характеристик [123, 124, 125]. В работе [126] на примере одного из больших ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года, были продемонстрированы все разработанные подходы к изучению ФП.

4.1. Исследование энергетических характеристик ФП

Система регистрации и обработки данных МГ УРАГАН позволяет измерять практически непрерывное зенитно-угловое распределение потока мюонов у поверхности Земли с достаточно малым интервалом дискретизации (1 минута). На рисунке 4.1 показана зависимость количества зарегистрированных событий от зенитного угла, нормированная на общее количество событий для всех зенитных углов ($\Delta\theta = 1°$) для трех супермодулей (СМ) мюонного годоскопа УРАГАН. Как видно из графика, функции для всех СМ практически идентичны. Скорость счета детектора за интервал зенитного угла увеличивается до 30° (хотя поток уменьшается, телесный угол увеличивается), а затем уменьшается [121].

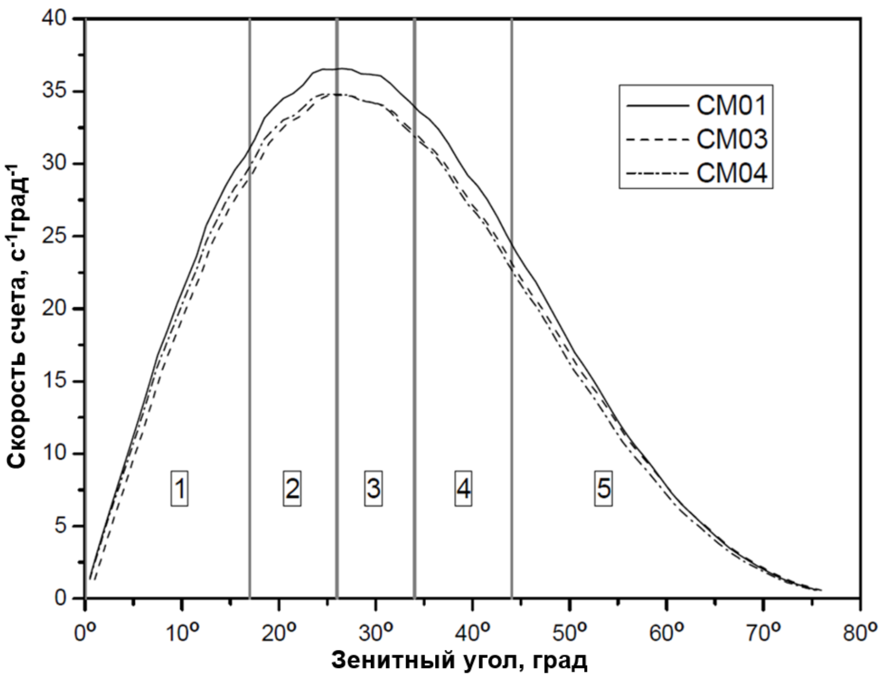


Рисунок 4.1. Зависимость скорости счета супермодулей мюонного годоскопа УРАГАН от зенитного угла [121]

Для анализа показателя амплитудного спектра ФП весь диапазон зенитных углов был разбит на несколько интервалов, которые имеют примерно одинаковую статистическую обеспеченность. Выбраны пять зенитно-угловых интервалов: [0° – 17°), [17° – 26°), [26° – 34°), [34° – 44°) и более 44°. Соответствующие области показаны на рисунке 4.1 вертикальными линиями и отмечены цифрами.

Для дальнейшего анализа используются 10-минутные интегральные скорости счета трех СМ для пяти выбранных интервалов зенитного угла, скорректированные на барометрический и температурный эффекты [76, 77].

На рисунке 4.2 показан пример регистрации ФП в двух крайних диапазонах зенитных углов. Изменения скорости счета в трех других промежутках лежат между ними. Наблюдается подобие зависимостей для разных углов, а амплитуда ФП с увеличением зенитного угла уменьшается, что связано с увеличением эффективной энергии первичных частиц. Это позволяет исследовать зависимость падения амплитуды скорости счета детектора во время ФП от энергии первичных частиц.

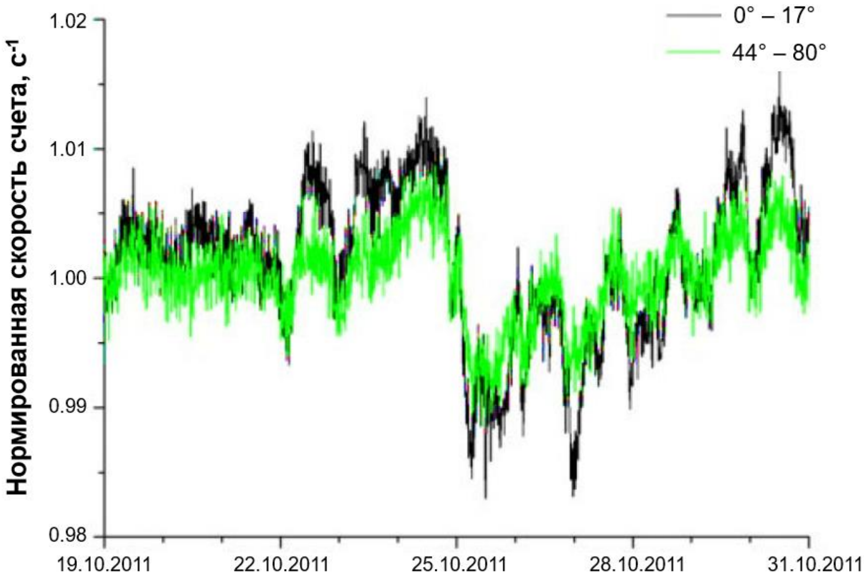


Рисунок 4.2. Скорость счета мюонного годоскопа УРАГАН во время ФП, зарегистрированного 24 октября 2011 года, в двух крайних интервалах зенитных углов [121]

Амплитуды ФП для каждого интервала зенитного угла рассчитывалась по специально разработанной методике, описанной в работе [120]. Данная методика основана на последовательных усреднениях скорости счета до и после ФП за различные интервалы времени с учетом различных трендов.

Чувствительность данных, полученных с помощью мюонного годоскопа, к показателю энергетического спектра КЛ объясняется тем, что за образование мюонов, регистрируемых под различными зенитными углами, ответственны первичные частицы с разными эффективными энергиями. Таким образом, если выбрать несколько диапазонов зенитного угла и определить для них соответствующую энергию первичных протонов и амплитуды форбуш-понижений, то можно оценить наклон энергетического спектра падения скорости счета за анализируемый период.

4.1.1. Методика расчета эффективной энергии первичных протонов при форбуш-понижениях

Для анализа вариаций первичных космических лучей наземными детекторами необходимы функции связи, позволяющие сравнивать зарегистрированные вариации скорости счета мюонов с изменениями интенсивности космических лучей в верхней части атмосферы. С помощью функций связи можно связать параметры спектра с вариациями космических лучей, зарегистрированных на поверхности Земли.

Количество мюонов, попадающих в единичную апертуру детектора от первичной частицы с энергией *E,* определяет функцию сбора детектора *P* (*E*, θ). Если знать ее и предполагать, что во время форбуш-понижений уменьшение потока ПКЛ выглядит как $\Delta J_p/J_p = R^{-\gamma}$ (здесь *R* – жесткость первичных частиц) [127], можно вычислить функцию отклика *G* (*E*, θ), которая показывает зависимость скорости счета детектора от энергии первичных частиц под углом θ. Затем будет возможно определить диапазон энергий первичных частиц, которые делают вклад в понижение скорости счета детектора (см. рисунок 4.3). На основе функции отклика детектора на понижение интенсивности потока первичных космических лучей можно вычислить среднее значение E_{av}, среднелогарифмическую $E_{\ln}$ и медианную $E_{0.5}$, а также нижнюю $E_{0.05}$ и верхнюю $E_{0.95}$ границы диапазона чувствительности мюонного годоскопа УРАГАН как для интегрального темпа счета, так и для отдельных зенитно-угловых интервалов [121].

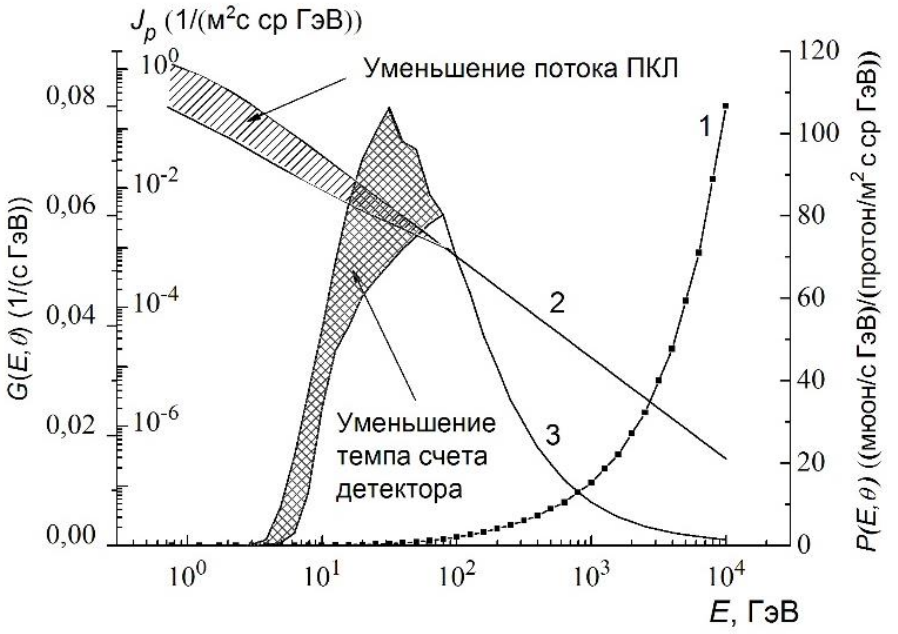


Рисунок 4.3. Пример расчета функции отклика для ФЭ: 1 – функция сбора P(E,θ); 2 – спектр первичных космических лучей; 3 – функция отклика G(E,θ) [121]

Такие расчеты были сделаны в работе [128] и используются при анализе различных событий и явлений, регистрируемых годоскопом [120], [124] и [125]. Величина γ в расчетах была принята равной единице. Значения эффективных энергий приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Эффективные энергии первичных частиц, ответственных за ФП, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН под различными зенитными углами

Интервалы зенитного угла, °	Нижняя граница чувствительности $E_{0.05}$, ГэВ	Медианная энергия $E_{0.5}$, ГэВ	Среднелогарифмическая энергия E_{ln}, ГэВ	Средняя энергия E_{cp}, ГэВ	Верхняя граница чувствительности $E_{0.95}$, ГэВ
0-17	4.99	13.55	14.68	16.05	51.05
17-26	5.20	14.33	15.50	16.93	53.13
26-34	5.87	16.19	17.51	18.96	56.38
34-44	6.69	18.36	19.74	21.22	59.36
> 44	8.58	24.13	25.32	26.88	65.72

Из таблицы видно, что мюонный годоскоп УРАГАН во время форбуш-понижений чувствителен к энергиям первичных частиц от 5 до 65 ГэВ, а пять зенитно-угловых интервалов соответствуют среднелогарифмическому диапазону энергии первичных протонов от 14 до 25 ГэВ.

Анализ энергетических характеристик основан на зависимости амплитуды понижения интенсивности мюонов космических лучей от среднелогарифмической энергии первичных частиц для пяти зенитно-угловых интервалов. Эти соотношения были аппроксимированы степенной функцией E^{α}. На рисунке 4.4 показаны четыре примера зависимости амплитуд ФП от среднелогарифмической энергии. Для анализа энергетических характеристик ФП на основе визуального анализа временных рядов данных МГ УРАГАН из дальнейшей обработки были исключены «сложные» ФП (наложение нескольких ФП на фазах понижения скорости счета). Были выбраны только те ФП, которые имели неискаженные интервалы продолжительностью более одного дня до и один день после уменьшения. Всего в период с 2006 по 2013 гг. было отобрано 62 ФП с амплитудами ≥ 0.5% [129].

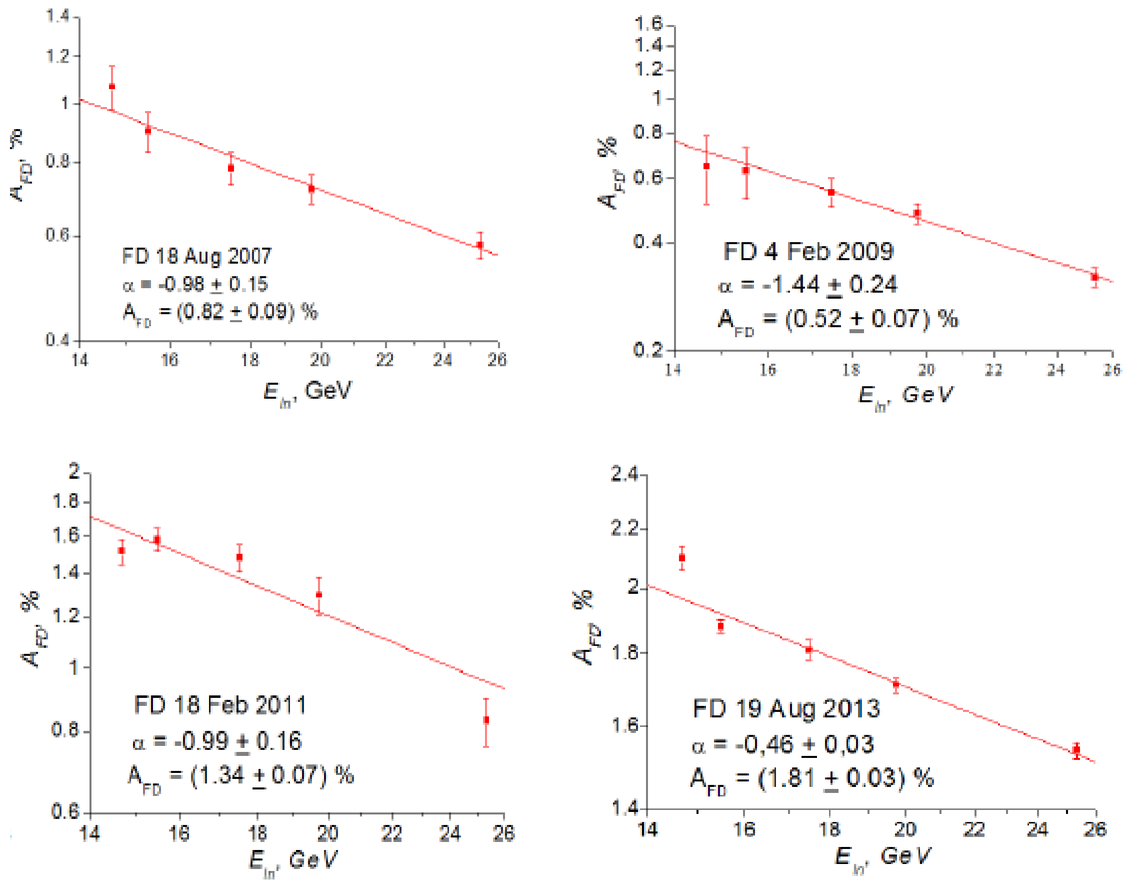


Рисунок 4.4. Примеры зависимостей амплитуды падения от среднелогарифмической энергии первичных частиц для нескольких ФП [129]

Как видно на рисунке 4.4, показатель α принимает разные значения для ФП с разной амплитудой. В основном α составляет около -1, но спектр может быть «мягче» (с α около -1.5) или «жестче» (с α ~-0.5). На рисунке 4.5 показано распределение полученных оценок α для 62 ФП. Это распределение характеризуется средним значением α около –1.00 со среднеквадратичным разбросом ± 0.48 [129].

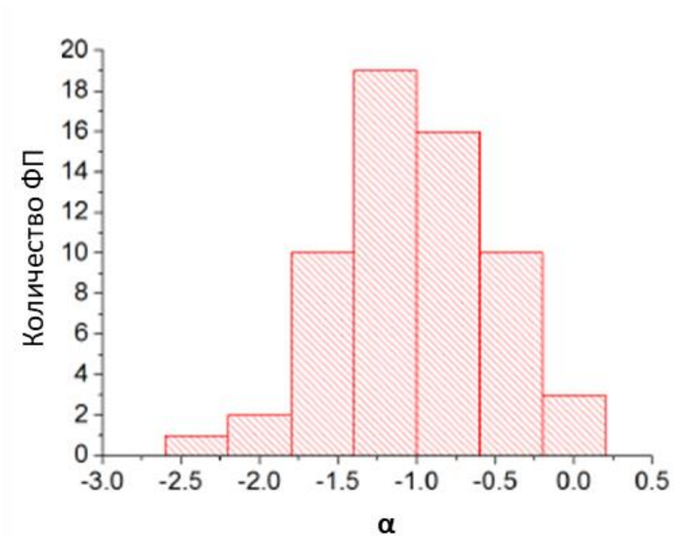


Рисунок 4.5. Распределение показателей спектра амплитуд для 62 ФП [129]

4.1.2. Методика анализа временных изменений амплитудных спектров форбуш-понижений

Особый интерес представляют исследования временной динамики показателя спектра амплитуд $\alpha(\tau)$ на разных фазах развития события (уменьшения, минимума и восстановления). Эти фазы соответствуют разным фазам влияния гелиосферного возмущения на поток космических лучей. Подобные исследования проводились ранее с использованием данных нейтронных мониторов и мюонных телескопов [130]. Хорошее временное и угловое разрешение мюонного годоскопа УРАГАН позволяет проводить эти исследования на одной установке. Для этого с использованием данных УРАГАН оценивался показатель спектра амплитуд с шагом в 40 – 60 минут. Амплитуды падения в разные моменты времени (t_i) определялись как разница между среднесуточной скоростью счета до уменьшения и средней скоростью счета за 40 или 60 минут на *i*-м шаге. На рисунке 4.6 показано сравнение вариаций скорости счета УРАГАН с $\alpha(\tau)$ для трех наиболее мощных ФП (14 декабря 2006 года, 18 февраля 2011 года и 7 марта 2012 года).

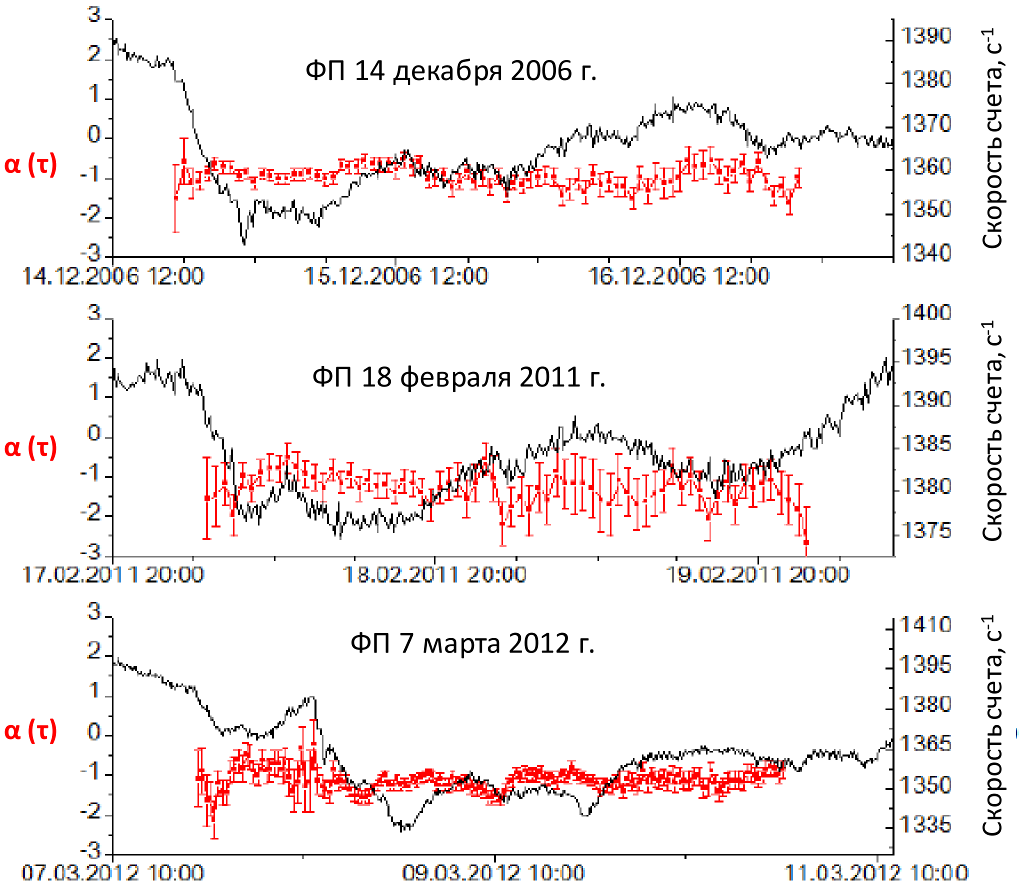


Рисунок 4.6. Примеры поведения динамики показателя спектра амплитуд для ФП (14 декабря 2006 года, 18 февраля 2011 года и 7 марта 2012 года)

На рисунках видно, что сходства в поведении скорости счета и индекса амплитудного спектра нет, то есть эти значения независимы. Наблюдается увеличение погрешностей на стадии роста скорости счета из-за неопределенности величины амплитуды от энергии первичных частиц в том случае, если в одном из интервалов угла (обычно пятом) амплитуда близка к нулю.

Впервые результаты исследования показателя спектра амплитуд на разных фазах развития ФП (понижении, минимуме и восстановлении), зарегистрированных в годоскопическом режиме, были опубликованы в работе [125]. В данном исследовании для анализа были отобраны 33 ФП, зарегистрированные в период с 2006 по 2011 гг., с амплитудами более 0.5% и неискаженными интервалами более одного дня до и после начала ФП. Были рассчитаны показатели α: для большинства ФП абсолютные значения α близки к единице, среднее значение α составляет ~ (-0.97), среднеквадратичное отклонение составляет ~ (±0.41). С применением разработанных подходов была исследована динамика показателя амплитудного спектра α на разных фазах развития ФП. Распределение средневзвешенных значений $\alpha(\tau)$, рассчитанных для всех 33 ФП для каждой фазы разработки, представлено на рисунке 4.7.

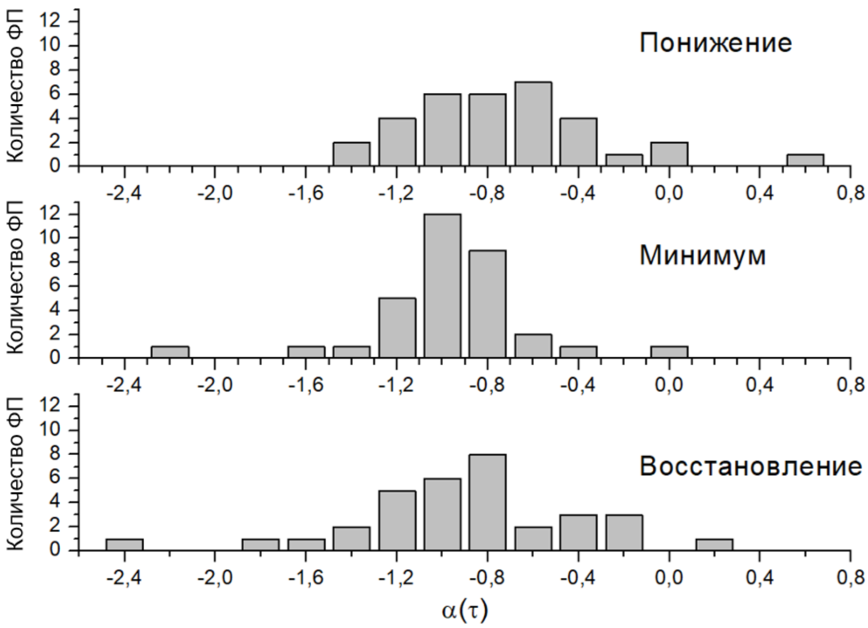


Рисунок 4.7. Распределение средневзвешенных значений $\alpha(\tau)$ для 33 ФП по разным фазам: понижение, минимум и восстановление

Среднее значение α для фазы понижения составляет около –0.72 ± 0.43, для фазы минимума – около –0.91 ± 0.36, а для фазы восстановления – около –0.90 ± 0.51 (указаны среднеквадратичные отклонения).

Впоследствии в работе [131] с применением разработанных ранее подходов был проведен анализ 38 ФП, зарегистрированных в период с 2012 по 2018 гг., с амплитудой более 0.5%. Были рассчитаны показатели амплитудного спектра α, при этом среднее значение α составило ~ -0.99, среднеквадратичное отклонение – ±0.28. Распределения средневзвешенных значений $\alpha(\tau)$ для каждой фазы развития ФП за период с 2012 по 2018 гг. представлены на рисунке 4.8.

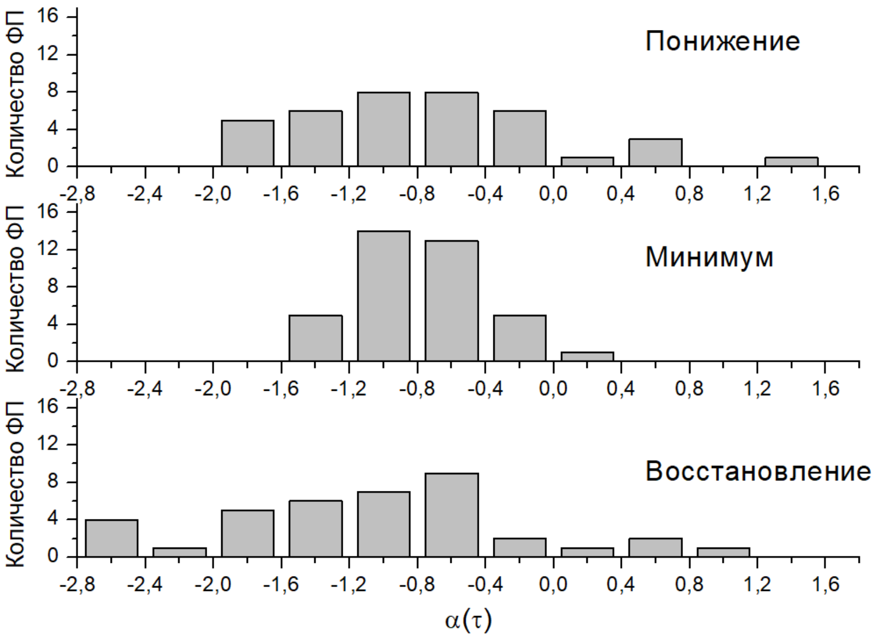


Рисунок 4.8. Распределения средневзвешенных значений показателя α(τ), оцененных для 38 ФП, которые произошли в период с 2012 по 2018 гг., для разных фаз ФП: понижение, минимум и восстановление

В таблице 4.2 приведены средневзвешенные значения $\alpha(\tau)$ для трех фаз развития ФП трех временных периодов: 2006 – 2011 гг., 2012 – 2018 гг. и 2006 – 2018 гг. [131].

Таблица 4.2. Средневзвешенные значения показателя спектра амплитуд $\alpha(\tau)$ для трех фаз развития ФП трех временных периодов: 2006 – 2011 гг., 2012 – 2018 гг. и 2006 – 2018 гг.

$<\alpha(\tau)>$	2006 – 2011	2012 – 2018	2006 – 2018
Фаза понижения	-0.72 ± 0.43	-0.73 ± 0.25	-0.72 ± 0.28
Фаза минимуму	-0.91 ± 0.36	-0.98 ± 0.08	-0.94 ± 0.37
Фаза восстановления	-0.90 ± 0.51	-0.98 ± 0.20	-0.94 ± 0.55

Полученные распределения показывают, что значения спектральных индексов α в периоды с 2006 по 2011 гг. и с 2012 по 2018 гг. хорошо согласуются и значимой разницы между значениями α для фаз минимума и восстановления нет.

4.1.3. Энергетические характеристики форбуш-понижений при различных типах гелиосферных возмущений

В работах [121] и [122] было проведено сопоставление энергетических характеристик ФП с различными типами гелиосферных возмущений. Анализировался семилетний период с 2007 по 2013 гг., который включает более половины солнечного цикла и различные его фазы: фазу спада 23-го солнечного цикла, а также фазы минимума и максимума 24-го солнечного цикла. Из 142 ФП, зарегистрированных в исследуемый период (включая ФП с амплитудой менее 0.5%), было отобрано 115 событий, в которых параметры межпланетного магнитного поля (B, B_z) хорошо разделялись. Для всех отобранных событий были рассчитаны изменения показателя спектра амплитуд за период гелиосферного возмущения. Для каждого форбуш-понижения исследовались возмущения в гелиосфере, которые могли его вызвать. Все гелиосферные возмущения были разделены на несколько типов согласно классификации Ермолаева Ю.И. [132]: «корональные выбросы масс» (CME), «корональные выбросы масс с ударной волной» (CME_IS) и «магнитное облако» (MC).

На рисунке 4.9 показано распределение значений показателя спектра амплитуд для 115 ФП. Важно отметить, что среднее значение изменилось незначительно и составляет около –1.07, среднеквадратичное отклонение составляет ~1.36. Такой большой разброс свидетельствует о разнообразии событий ФП.

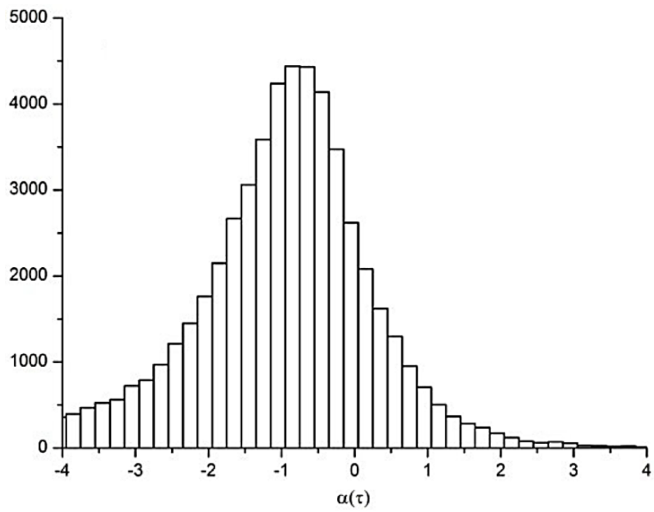


Рисунок 4.9. Распределение оценок значений показателя спектра амплитуд, рассчитанного для 115 ФП [121]

Нормированные распределения значений показателя спектра амплитуд для 115 ФП в зависимости от типов гелиосферных возмущений показаны на рисунке 4.10. Средневзвешенные значения показателя спектра амплитуд составили для CME (-0.78 ± 1.00), для CME_IS – (-1.00 ± 1.24), для MC – (-1.13 ± 1.12). Видно, что средние значения α для групп ФП, вызванных CME и MC, различны, но также следует отметить большой разброс этих величин, который может быть связан с тем, что возмущения принадлежат разным фазам солнечного цикла.

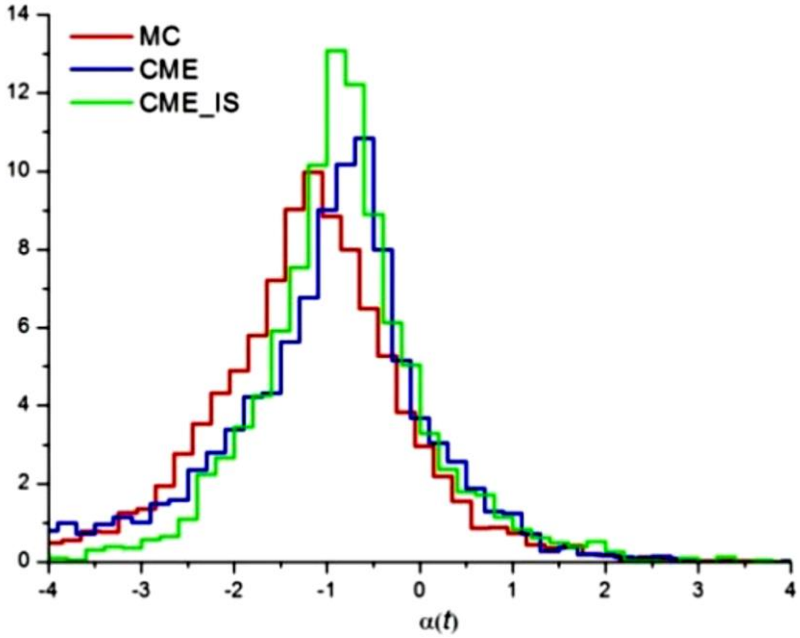


Рисунок 4.10. Нормированные распределения оценок показателя спектра амплитуд для 115 ФП в зависимости от типа возмущения: MC, CME, CME_IS [121]

На рисунке 4.10 видно, что по показателю спектра амплитуд отличить тип возмущения очень сложно. Поэтому был проведен анализ событий, зарегистрированных в разных фазах солнечного цикла.

На рисунке 4.11 показаны временные изменения вектора магнитной индукции межпланетного магнитного поля и его проекции на ось Z (вверху, левая шкала), а также временные изменения индекса α (внизу, правая шкала) за достаточно длительный период времени (25 дней), который приходится на минимум солнечной активности. В указанный период было небольшое количество гелиосферных событий, поэтому они хорошо разделялись: два MC (31 декабря 2008 года и 19 января 2009 года) и два CME (9 и 14 января 2009 года). Средние значения показателя амплитудного спектра для корональных выбросов массы составляют (-0.41 ± 0.27) и (-0.55 ± 0.28), а для магнитных облаков – (-0.29 ± 0.47) и (-0.23 ± 0.13). Из абсолютных значений видно, что события, интерпретируемые как «магнитные облака», имеют более жесткий спектр, чем корональные выбросы массы.

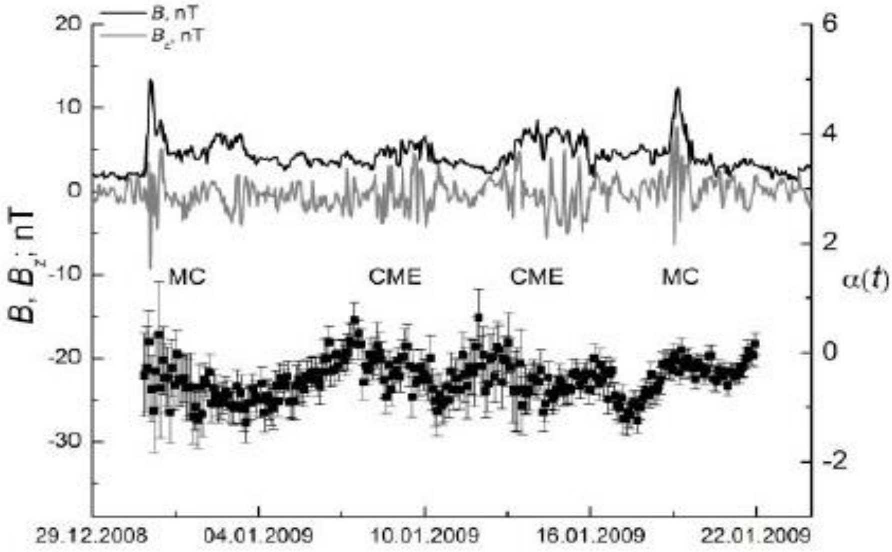


Рисунок 4.11. Временные изменения B и B_z и показатель α спектра амплитуд в период с 29 декабря 2008 года по 22 января 2009 года

Второй период (с 6 по 12 марта 2012 года) приходится на максимум солнечной активности (рисунок 4.12). В этот период произошло два события: CME_IS (с 6 по 8 марта 2012 года) и MC (с 8 по 9 марта 2012 года). Для CME_IS значения показателя спектра амплитуд имеют большой разброс (от 0 до 2), в то время как для MC показатель α ведет себя более стабильно, его среднее значение составляет (-1.13 ± 0.21). Среднее же значение показателя спектра амплитуд для CME_IS составляет (-0.90 ± 0.72).

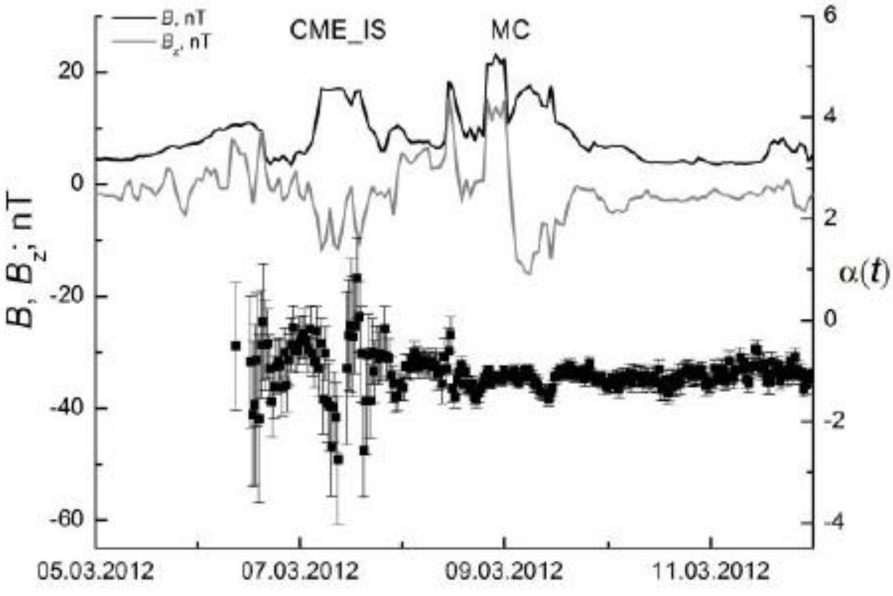


Рисунок 4.12. Временные изменения B и B_z и показателя α в период с 6 по 12 марта 2012 года

Таким образом, показатель спектра амплитуд для двух типов возмущений в 2009 году по абсолютной величине меньше, чем в 2012 году. В минимуме солнечной активности (2009 год) он одинаков для CME: (-0.41 ± 0.27) и (-0.55 ± 0.28), для MC: (-0.29 ± 0.47) и (-0.23 ± 0.13). В максимуме солнечной активности (2012 год) для КВМ с ударной волной показатель составляет (-0.90 ± 0.72), а для MC – (-1.13 ± 0.21). Видно существенное различие показателей спектра амплитуд для ФП, вызванных гелиосферными возмущениями одного типа, на фазах максимума и минимума солнечной активности. Кроме того, стоит отметить, что каждое событие само по себе уникально, поэтому значения показателя спектра амплитуд различаются.

4.2. Исследование пространственно-угловых характеристик ФП

Мюонография позволяет изучать пространственно-угловые характеристики потока мюонов во время различных гелиосферных возмущений, в том числе тех, которые имели влияние на вариации потока мюонов и сопровождались ФП. Для описания анизотропии событий и деформации угловой зависимости потока космических лучей во время форбуш-понижений используются вектор локальной анизотропии и горизонтальная проекция этого вектора, которая характеризует величину бокового смещения углового распределения потока мюонов – r_h. Для исследования закономерностей в изменениях анизотропии потока мюонов во время ФП по азимутальным направлениям удобно использовать проекции векторов r_S и r_E, рассчитанных в географических координатах, а для количественного описания изменений углового распределения потока мюонов (для описания мюонографий) – корреляционную зависимость между ними. Такие исследования велись поэтапно, т.е. по мере накопления статистики по ФП.

4.2.1. Исследование деформации угловой зависимости потока космических лучей во время форбуш-понижений

Исследование деформаций угловой зависимости основывается на сопоставлении параметров локальной анизотропии и параметров межпланетного магнитного поля [124].

На рисунке 4.13 приведена динамика изменения величины горизонтальной проекции r_h вектора относительной анизотропии потока мюонов и перпендикулярной плоскости эклиптики составляющей вектора межпланетного магнитного поля B_z для одного из самых больших по амплитуде ФП, произошедшего 14 декабря 2006 года.

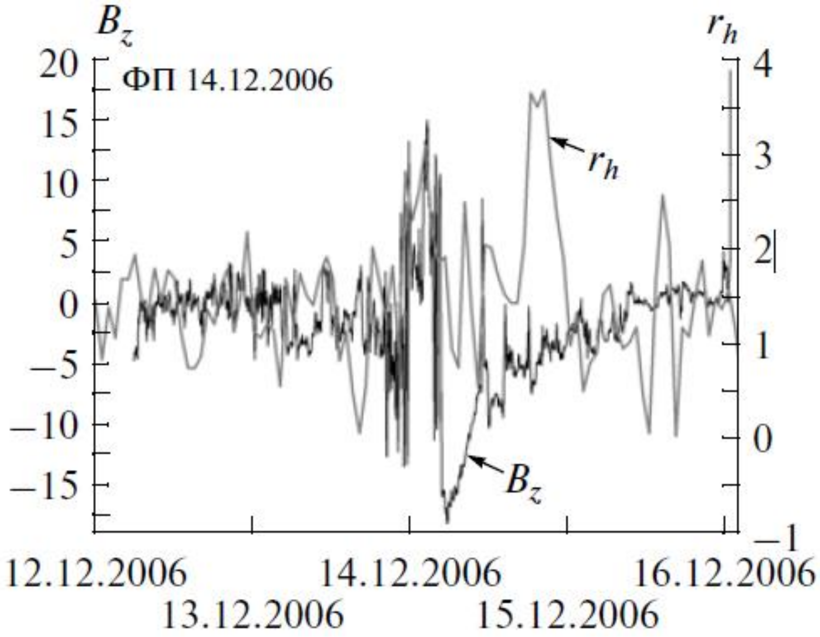


Рисунок 4.13. Сопоставление горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов r_h (в единицах статистической погрешности) с проекцией вектора магнитной индукции на ось z межпланетного магнитного поля в период с 12 по 16 декабря 2016 года

На рисунке хорошо видно, что первое пиковое значение горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии совпадает с началом возмущения величины B_z. Однако в этом событии наблюдается второй пик в анизотропии потока мюонов, зафиксированный через несколько часов после прохождения магнитного облака, причем в этот интервал времени величина B_z практически не возмущена. Подобный эффект можно объяснить тем, что B_z фиксировался спутником, который регистрировал изменения межпланетного магнитного поля в точке Лагранжа L1, однако через несколько часов после прохождения гелиосферного возмущения магнитное поле в районе нахождения спутника вернулось практически к невозмущенному уровню. В это время область с возмущенным магнитным полем по-прежнему находилась недалеко от Земли, и в период, когда конус приема мюонного годоскопа был направлен на это возмущение (с учетом искривления траектории КЛ в магнитосфере), мюонный годоскоп зарегистрировал сильное искажение угловой зависимости потока мюонов и большое значение относительной анизотропии.

Оценка прогностического потенциала [125] была проведена с помощью горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии r_h. Для этого были отобраны 13 ФП, которые можно сопоставить с соответствующими возмущениями солнечного ветра (СВ), ММП и магнитосферы. В качестве примера на рисунке 4.14

(слева) показано изменение этих параметров и динамики r_h в период с 13 по 25 февраля 2011 года. В этот период были зарегистрированы два форбуш-понижения, зафиксированные 15 и 18 февраля 2011 года. Для всех 13 ФП разница во времени между началом возмущения r_h (резкое увеличение до ≥ 1.2 σ в течение 1 часа с последующим общим увеличением до более чем 2.3 σ) и началом возмущения скорости солнечного ветра (Δt_V), значения вектора магнитной индукции B (Δt_B) и Dst-индекса (момент понижения SSC или индекса) (Δt_{Dst}) показаны на рисунке 4.14 (справа).

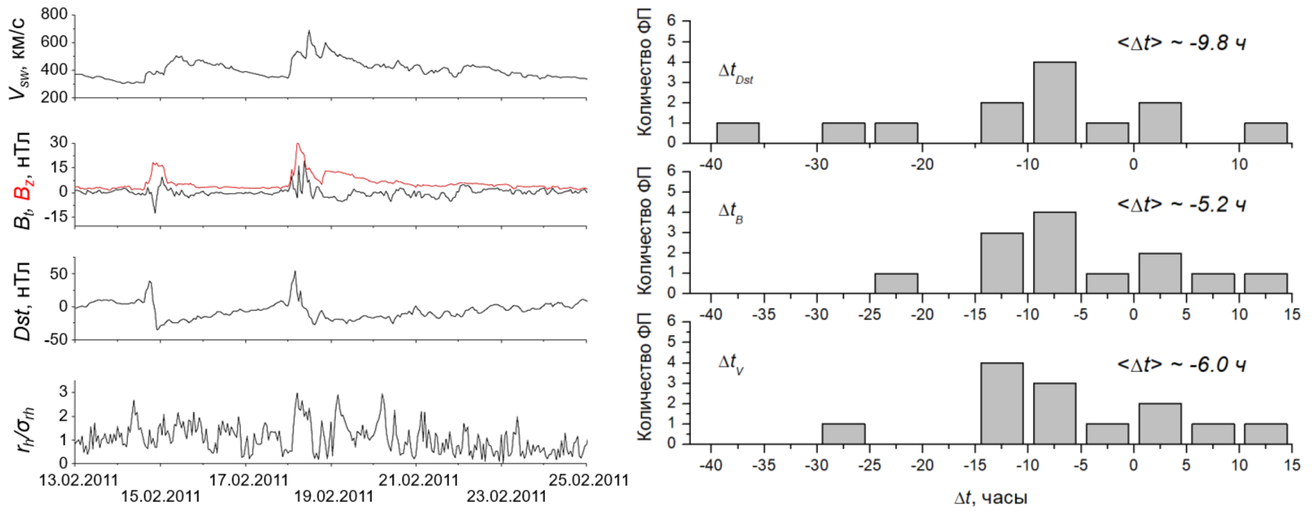


Рисунок 4.14. Пример изменения скорости солнечного ветра V_{SW}, вектора магнитной индукции B_t и его проекции B_Z (данные OMNI) и динамики r_h (слева); распределения Δt_{Dst}, Δt_B и Δt_V (справа)

Из полученных распределений следует, что в большинстве случаев возмущения горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии для выбранных 13 ФП наблюдаются раньше возмущений характеристик СВ и ММП в среднем на ~5 – 6 часов, а Dst на ~10 часов. Таким образом, изменения параметра r_h могут рассматриваться в качестве предвестника магнитных возмущений.

4.2.2. Исследования закономерностей в изменениях анизотропии потока мюонов во время ФП по азимутальным направлениям

Мюонографии позволяют исследовать закономерности в изменениях анизотропии потока мюонов во время ФП по азимутальным направлениям. Такие исследования были проведены в работе [133] для 44 отобранных ФП, зафиксированных в период с 2007 по 2012 гг., в работе [129] для 62 отобранных ФП, зафиксированных в период с 2006 по 2013 гг., а в работе [131] для 75 ФП, зарегистрированных в период с 2007 по 2018 гг.

Для всех анализируемых ФП были построены мюонографии. На рисунках 4.15 и 4.16 представлены примеры мюонографий ФП, зарегистрированных в годоскопическом режиме.

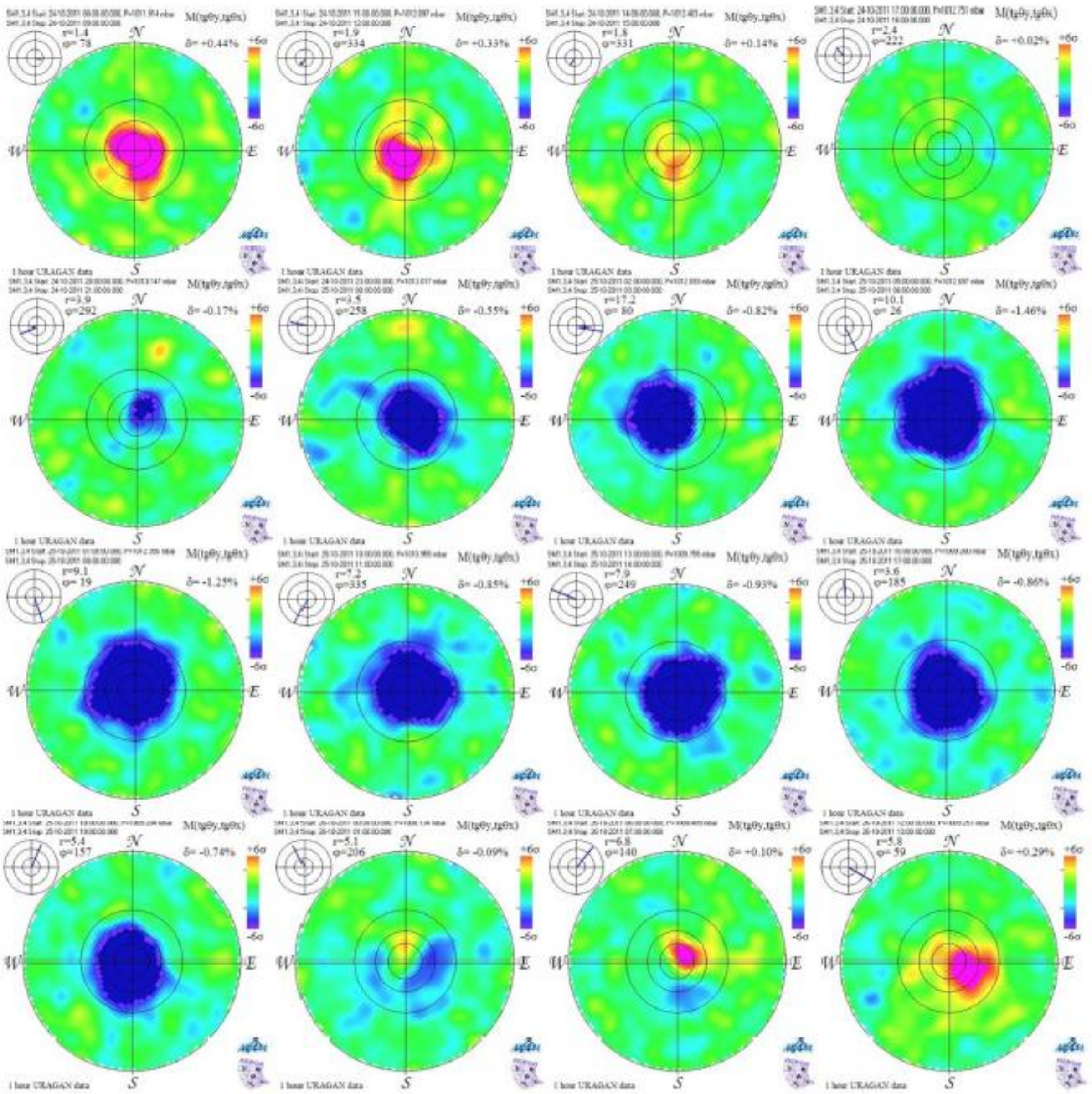


Рисунок 4.15. Мюонографии ФП, зарегистрированного 24 октября 2011 года

На рисунке 4.15 показаны мюонографии для ФП, зарегистрированного 24 октября 2011 года. Это событие сопровождалось достаточно большим понижением скорости счета, которое фиксировалось многими нейтронными мониторами. По данным УРАГАН и Московского нейтронного монитора его амплитуда составляла около 1.5% и 4.5% соответственно. Каждый ряд снимков на рисунке соответствует определенной фазе развития ФП: первый ряд отражает период до начала форбуш-понижения (24.10.2011 8:00 – 24.10.2011 18:00, каждые 3 часа); второй ряд – фазу падения (24.10.2011 20:00 – 25.10.2011 6:00, каждые 3 часа); третий ряд – фазу минимума (25.10.2011 7:00 –

25.10.2011 17:00, каждые 3 часа); четвертый ряд соответствует фазе восстановления (25.10.2011 18:00 – 26.10.2011 13:00, каждые 6 часов). На рисунке отчетливо видны вариации потока мюонов под разными углами во время ФП. Во время первой фазы ФП наблюдается увеличение скорости счета в диапазоне зенитных углов от 0° до 45°, которое затухает перед началом ФП. В фазе убывания и минимума уменьшение скорости счета мюонов начинается в том же диапазоне зенитных углов, но со смещением азимута N-E. К 5:00 25.10.2011 уменьшение скорости счета распространилось на частицы, зарегистрированные под зенитными углами более 60°. В фазе минимума уменьшение потока регистрируемых частиц выявлено также в широком диапазоне зенитных углов от 0° до 60°. На этапе восстановления скорость счета изменилась с уменьшения в юго-западном направлении на увеличение в юго-восточном направлении.

На рисунке 4.16 показаны мюонографии ФП, зарегистрированного 23 июня 2013 года, с часовой экспозицией. Каждый ряд снимков на рисунке соответствует разной фазе развития ФП: первый ряд отражает период до начала форбуш-понижения (23.06.2013 07:00 – 23.06.2013 11:00, каждый час); второй – фазу падения (23.06.2013 12:00 – 23.06.2013 20:00, каждые 2 часа); третий – фазу минимума (23.06.2013 21:00 – 24.06.2013 09:00, каждые 3 часа); четвертый ряд соответствует фазе восстановления (24.06.2013 11:00 – 25.06.2013 07:00, каждые 5 часов). Это событие также характеризуется повышением скорости счета потока мюонов космических лучей до начала ФП. На фазах падения и минимума наблюдается уменьшение потока мюонов в околовертикальном направлении.

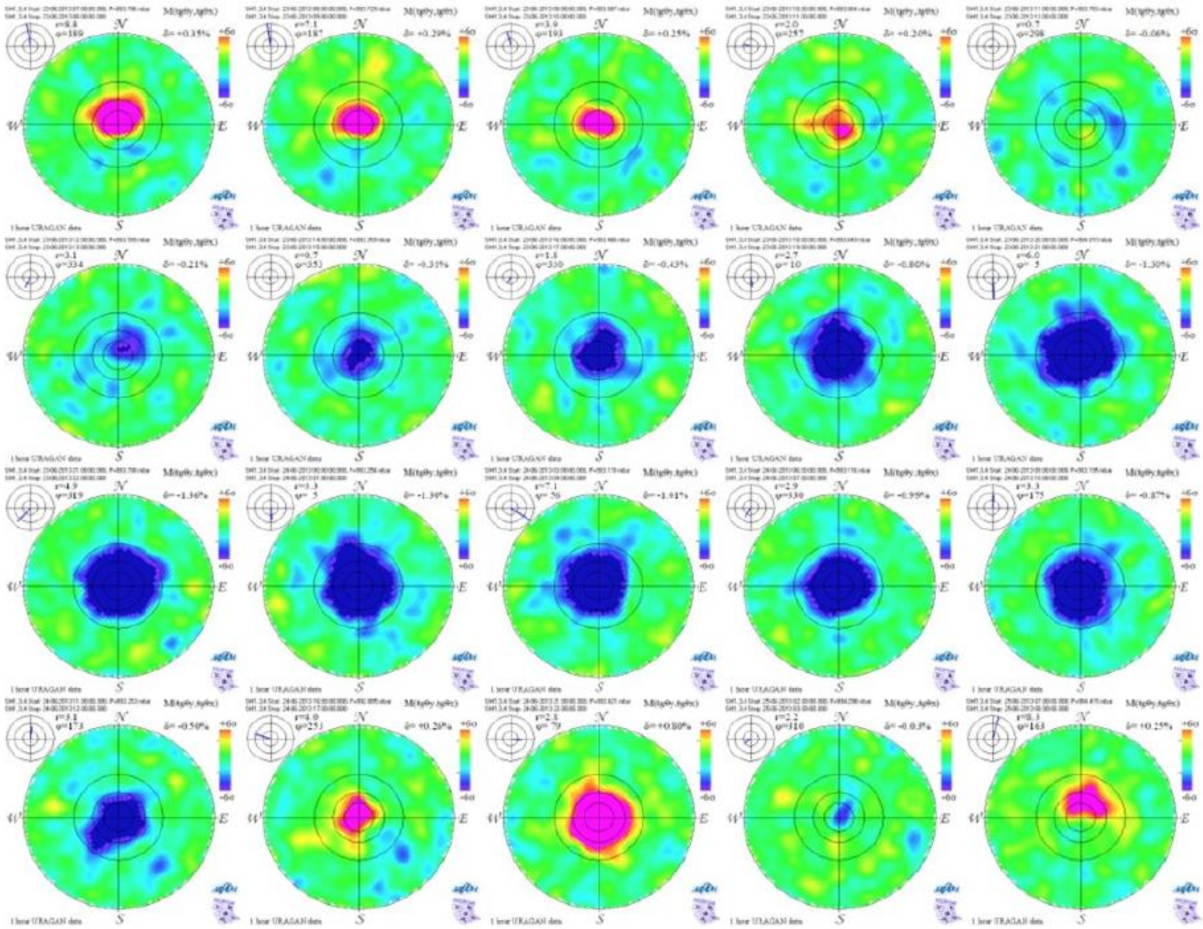


Рисунок 4.16. Мюонографии ФП, зарегистрированного 23 июня 2013 года

Для анализа изменения анизотропии потока мюонов по азимутальным направлениям для ФП были построены корреляции между проекциями вектора относительной анизотропии на географический юг и восток. На рисунках 4.17 и 4.18 представлены такие корреляции для ФП, зарегистрированных 24 октября 2011 года и 23 июля 2013 года.

Корреляции между проекциями вектора относительной анизотропии r_S и r_E во время ФП, зарегистрированного 24 октября 2011 года, показаны на рисунке 4.17. Кружки на графиках соответствуют пределам изменений r_S и r_E, равным 0.52×10^{-3} в спокойный период 7 – 10 февраля 2009 года, который характеризуется отсутствием возмущений в гелиосфере и магнитосфере Земли. Среднеквадратичные значения r_S и r_E в течение этого периода составляют $\sigma(r_S) = 1.30\times10^{-4}$ и $\sigma(r_E) = 1.28\times10^{-4}$ соответственно. Таким образом, выход за границы круга соответствует превышению вариаций r_S и r_E на 4σ.

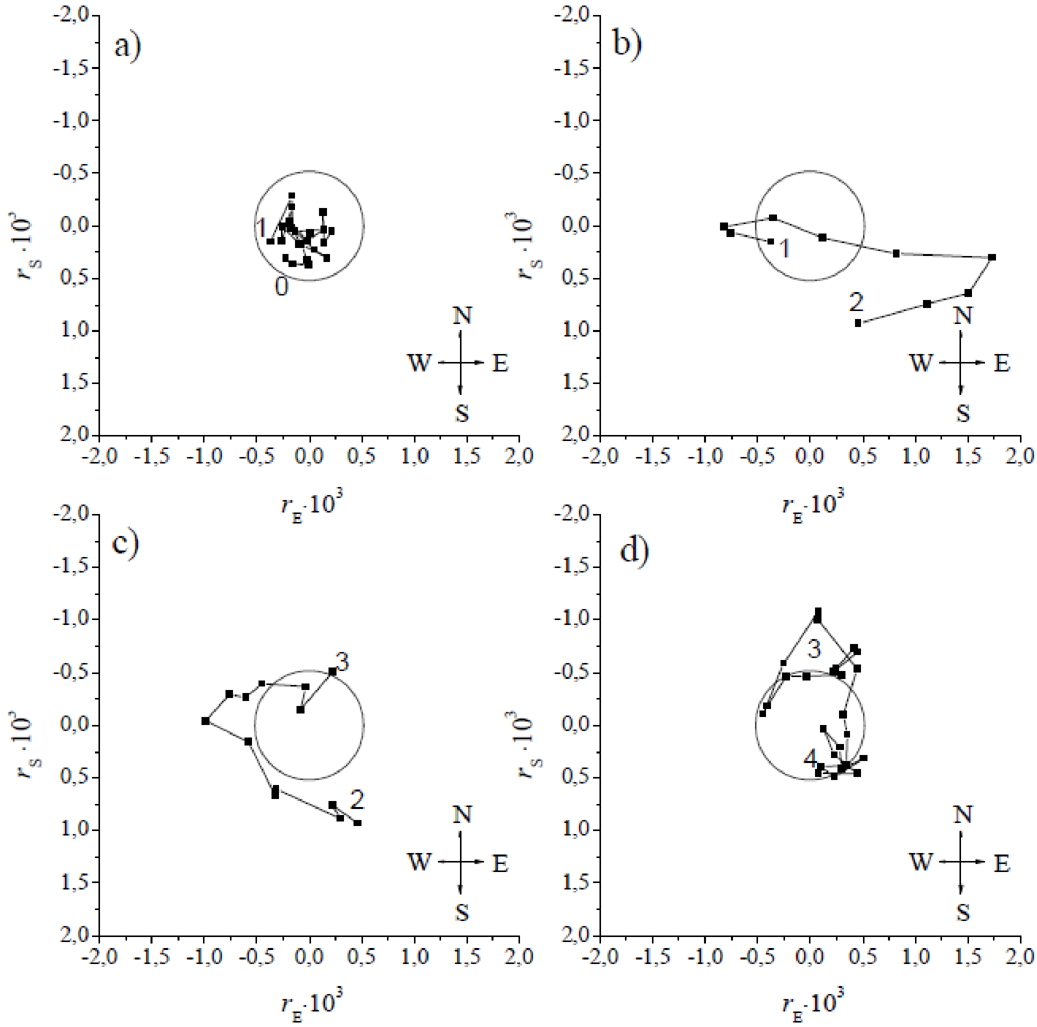


Рисунок 4.17. Корреляции между r_S и r_E для ФП, зарегистрированного 24 октября 2011 года, на четырех фазах развития события: (а) 0 – 23.10.2011 20:00 UTC, 1 – 24.10.2011 20:00 UTC; (б) 1 – 24.10.2011 20:00 UTC, 2 – 25.10.2011 5:00 UTC; (с) 2 – 25.10.2011 5:00 UTC, 3 – 25.10.2011 18:00 UTC; (d) 3 – 25.10.2011 18:00 UTC, 4 – 26.10.2011 18:00 UTC

Как видно на рисунке 4.17, во время первой фазы ФП изменения относительной анизотропии не наблюдаются. На других фазах наблюдается превышение относительной анизотропии потока мюонов по сравнению с нормальным значением: в фазе спада она преобладает в азимутальном направлении запад-восток, в фазе минимума движется с юга на север, во время фазы восстановления смещается на географический север. Рисунок 4.18 также наглядно иллюстрирует изменение анизотропии потока мюонов во время различных фаз развития ФП. Аналогичный подход был применен ко всем анализируемым ФП.

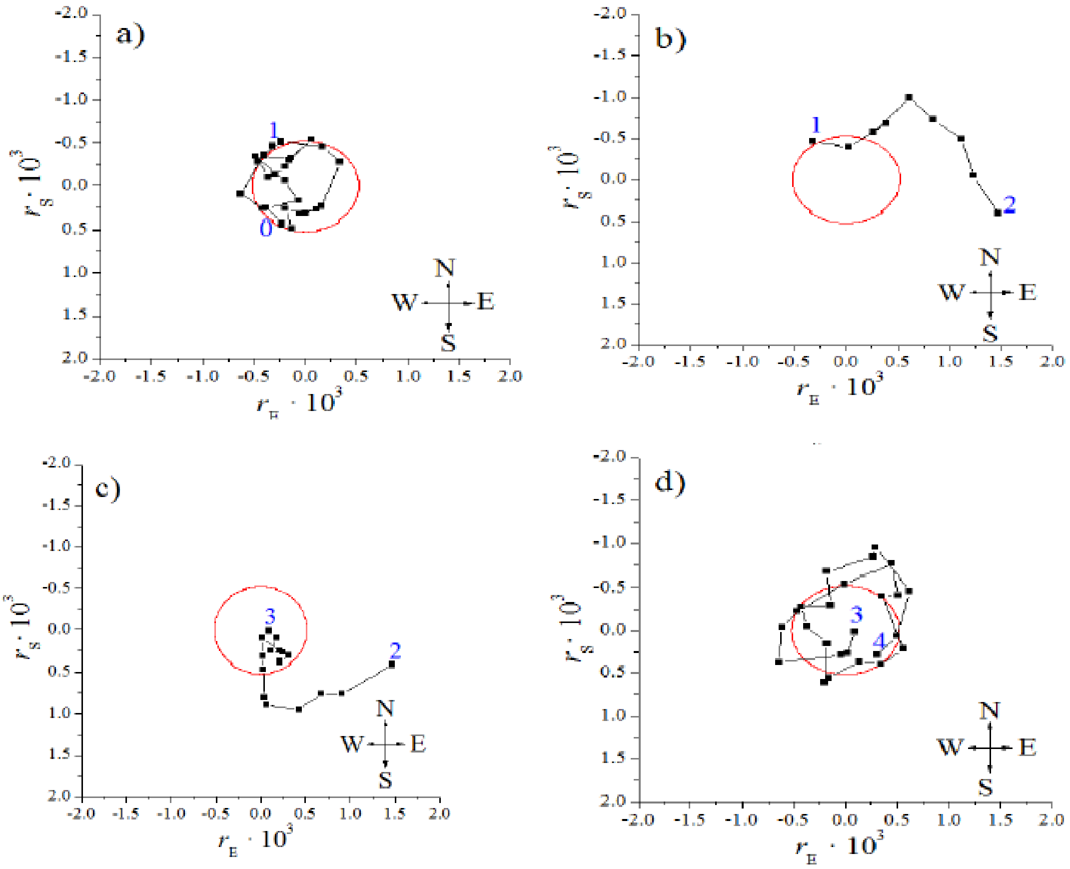


Рисунок 4.18. Корреляции между r_S и r_E для ФП, зарегистрированного 23 июня 2013 года, во время четырех фаз развития события.

Моменты времени: 0 – 22.06.2013 12:00 UTC, 1 – 23.06.2013 12:00 UTC; 2 – 23.06.2013 20:00 UTC; 3 – 24.06.2013 11:00 UTC; 4 – 25.06.2013 11:00 UTC

Распределения значений проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов на географический восток и юг впервые были получены для 44 ФП, зарегистрированных в период с 2007 по 2012 гг. [123,133]. На рисунке 4.19 представлены эти распределения. Анализ 44 ФП показал, что относительная анизотропия, превышающая вариации r_S и r_E более чем на 4σ, наблюдается на всех фазах в 12 ФП, на трех фазах в 11 ФП, в двух фазах в 7 ФП, в одной фазе в 6 ФП и отсутствует на всех фазах в 8 ФП. Изучение каждой фазы в отдельности показало, что наблюдается значительная относительная анизотропия в период до ФП в 25 ФП, в фазе спада – в 27 ФП, в фазе минимума – в 25 ФП, в фазе восстановления – в 24 ФП.

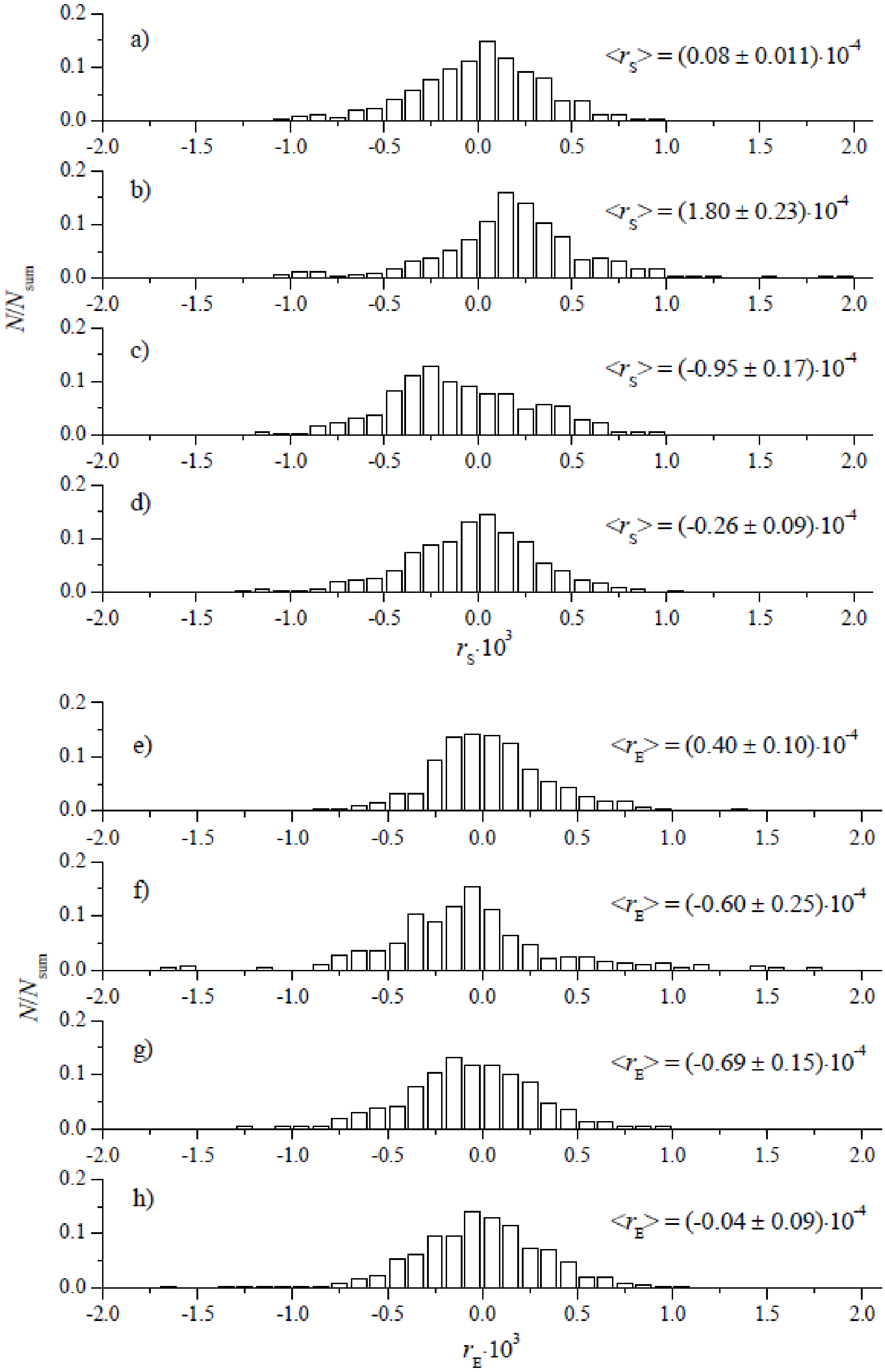


Рисунок 4.19. Распределения значений параметров r_S (вверху) и r_E (внизу) для четырех фаз развития ФП: (a) и (e) – до начала ФП; (b) и (f) – фаза убывания; (c) и (g) – фаза минимума; (d) и (h) – фаза восстановления [123, 133]

Таким образом, в среднем на фазе понижения скорости счета во время ФП поток мюонов с географического юга уменьшается слабее, чем с севера, на фазе минимума происходит обратный процесс, что соответствует изменению западно-восточной анизотропии первичных космических лучей. На остальных фазах относительная анизотропия практически симметрична. Впоследствии эти результаты были подтверждены в работе [131]. В данном исследовании на основе разработанных подходов был проведен аналогичный анализ 75 ФП, зарегистрированных с 2007 по 2018 гг. В таблице 4.3 представлены средние значения параметров r_S и r_E для четырех фаз ФП, зарегистрированных в периоды с 2007 по 2012 гг. и с 2007 по 2018 гг.

Таблица 4.3. Средние значения проекций вектора анизотропии r_S и r_E для четырех фаз ФП, зарегистрированных в периоды с 2007 по 2012 гг. и с 2007 по 2018 гг.

	$\langle r_{E\,(2007-2012)} \rangle, 10^{-4}$	$\langle r_{E\,(2007-2018)} \rangle, 10^{-4}$	$\langle r_{S\,(2007-2012)} \rangle, 10^{-4}$	$\langle r_{S\,(2007-2018)} \rangle, 10^{-4}$
До начла ФП	0.40 ± 0.10	0.78 ± 0.11	0.08 ± 0.011	0.50 ± 0.11
Фаза понижения	-0.60 ± 0.25	-0.60 ± 0.18	1.80 ± 0.23	1.60 ± 0.15
Фаза минимуму	-0.69 ± 0.15	-0.60 ± 0.18	-0.95 ± 0.17	-0.90 ± 0.20
Фаза восстановления	-0.04 ± 0.09	0.03 ± 0.06	-0.26 ± 0.09	-0.40 ± 0.06

Распределения значений параметров r_S и r_E непосредственно перед ФП были симметричными и лежали в основном в диапазоне (от -1.0 до $1.0)\times10^{-3}$. Более широкий диапазон наблюдается на фазе падения для обоих параметров. Также показано, что на фазе восстановления распределения параметров относительной анизотропии практически симметричны, а поток мюонов с географического юга на стадии убывания скорости счета во время ФП уменьшается меньше, чем поток мюонов с севера. Обратный процесс наблюдаем на минимальной фазе ФП, что соответствует изменению восточно-западной анизотропии первичных космических лучей. На остальных этапах относительная анизотропия остается практически симметричной. Полученные результаты согласуются с результатами в период с 2007 по 2012 гг.

Таким образом, использование корреляций между проекциями r_E и r_S вектора относительной анизотропии позволяет количественно изучать временные изменения анизотропии потока мюонов на разных фазах развития ФП. Анализ форбуш-понижений, зарегистрированных в годоскопическом режиме, показал, что изменения относительной анизотропии вариаций потока мюонов наблюдаются в основном на фазах падения и минимума и в среднем соответствуют восточно-западной анизотропии первичных космических лучей.

4.3. Комплексный анализ ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года

В работе [126] с применением разработанных подходов проведен комплексный анализ одного из самых больших по амплитуде ФП. Выявлены характеристики вариаций потока мюонов космических лучей во время этого ФП: интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные. На их основе получены амплитуды ФП для различных угловых диапазонов, показателей степени энергетической зависимости амплитуды падения интенсивности космических лучей в области энергий 10-30 ГэВ, их временные зависимости на разных фазах развития ФП, мюонные снимки (мюонографии), горизонтальные проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов и корреляции между его проекциями на направления север-юг и восток-запад.

На рисунке 4.20 показаны нормированные вариации потока космических лучей, измеренные мюонным годоскопом УРАГАН и Московским нейтронным монитором (МОСК) в период с 15 июня по 1 июля 2015 года.

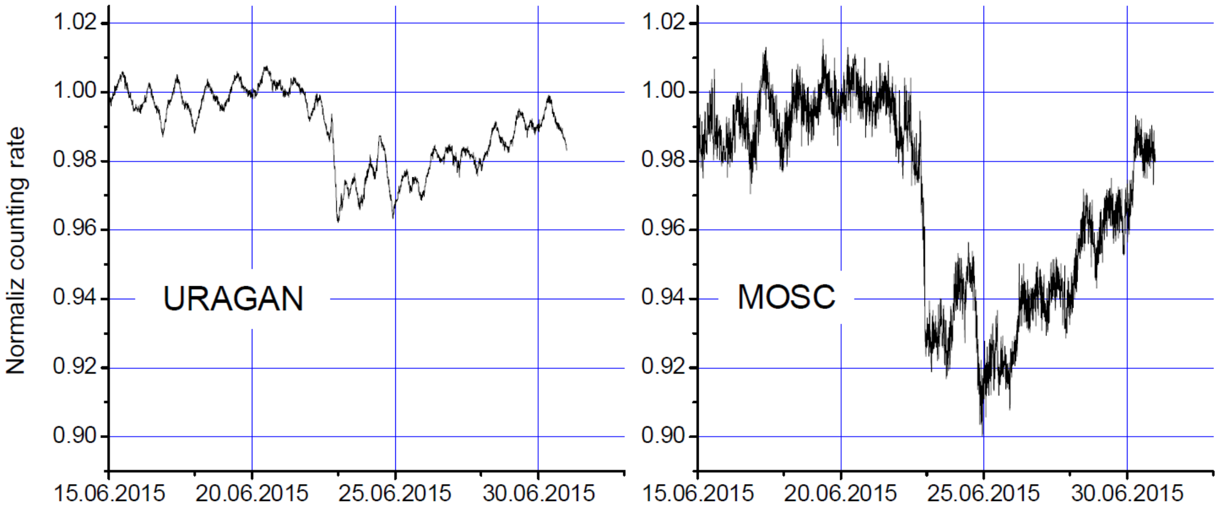


Рисунок 4.20. Нормированные вариации потока космических лучей по данным УРАГАН и MOSC, полученные в период с 15 июня по 1 июля 2015 года

В исследуемый период солнечная активность перед ФП была высокой. Вариации скорости счета УРАГАН были вызваны вспышками класса M 21.06.2015 в 01:02 UTC (M2.0) и 02:06 UTC (M2.6) и последующими CME (гало II типа) в 02:36 UTC со скоростью до 1560 км/с и CME в 02:48 UTC со скоростью до 1950 км/с [134]. Околоземное пространство в этот период также находилось в возмущенном состоянии. На рисунке 4.21 показаны вариации межпланетного магнитного поля (B_t, B_z), скорости солнечного ветра (V_{SW}) и скорости счета мюонов в период с 18 по 30 июня 2015 года.

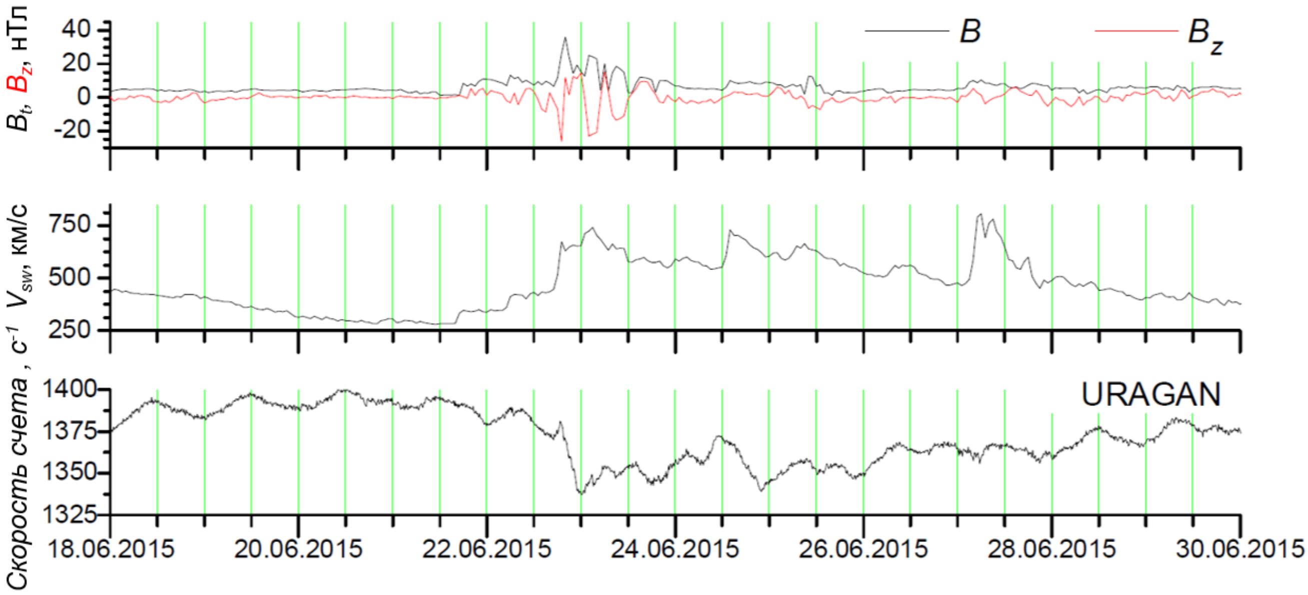


Рисунок. 4.21. Изменения параметров межпланетного магнитного поля (B_t, B_z), скорости солнечного ветра (V_{SW}) и скорости счета мюонов по данным мюонного годоскопа УРАГАН в период с 18 по 30 июня 2015 года

На рисунке видно, что сильное возмущение межпланетного магнитного поля начинается одновременно с увеличением скорости солнечного ветра в 16:00 UTC 22 июня. Параметры ММП B_t и B_z изменяются до 30 и –30 нТл соответственно. Скорость солнечного ветра изменяется от 400 до 700 км/с. Геомагнитные возмущения на Земле зарегистрированы по SSC 21 июня 2015 года в 17:00 UTC, по *Dst*-индексу – 23 июня в 05:00 UTC, по *Kp*-индексу – 22 июня в 18:00 UTC.

В потоке мюонов, как и в потоке нейтронов, по данным MOSC, начало убывания зафиксировано мюонным годоскопом 22.06.2015 в 19:10 UTC. Амплитуда уменьшения интегральной скорости счета УРАГАН составила (2.41 ± 0.16)%. Амплитуда уменьшения скорости счета в MOSC составила (5.60 ± 0.20)%. Отношение амплитуд уменьшения МГ УРАГАН и MOSC $A_{FD}^{URG} \approx 0.43 A_{FD}^{MOSC}$.

На рисунке 4.22(а) показана зависимость A_{FD} от E_{ln} и рассчитанное значение α. На рисунке 4.22(б) показаны временные изменения показателя спектра амплитуд.

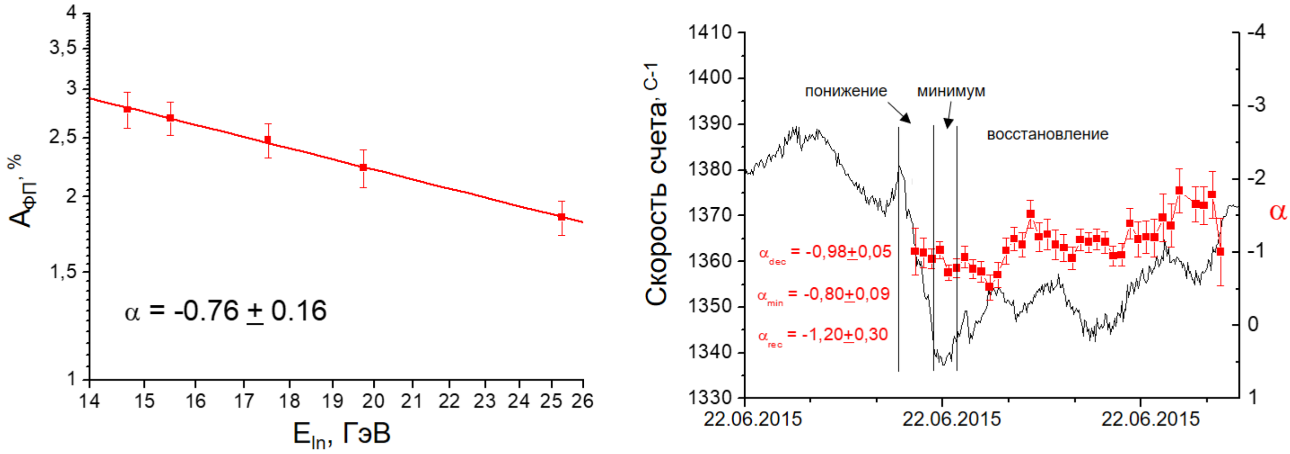


Рисунок 4.22. Зависимость амплитуды падения от среднелогарифмической энергии (слева) и временные вариации показателя спектра амплитуд (справа) для ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года

Анализ всех ФП, зарегистрированных УРАГАН, показал, что в среднем показатель α энергетической зависимости близок к -1. Как видно из рисунка 3.32(а), амплитудный спектр для ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года, более «жесткий» и составляет (α = -0.76 ± 0.16), а амплитуды для зенитных углов выше 44° (для среднелогарифмической энергии первичных частиц, превышающей 25 ГэВ) составляют около 2%. Временные вариации индекса α (рисунок 4.22(б)) для исследуемого события показывают, что на фазе падения его среднее значение составляет (-0.98 ± 0.05), в минимуме – α = (-0.80 ± 0.09), а в период восстановления – α = (-1.20 ± 0.30). Из полученных данных видно, что при минимуме скорости счета спектр амплитуд более «жесткий», чем во время фазы падения, однако на фазе восстановления наблюдается более «мягкий» спектр.

В результате анализа мюонографий были получены пространственные и угловые характеристики потока мюонов во время ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года. На рисунке 4.23 показаны мюонографии фазы падения.

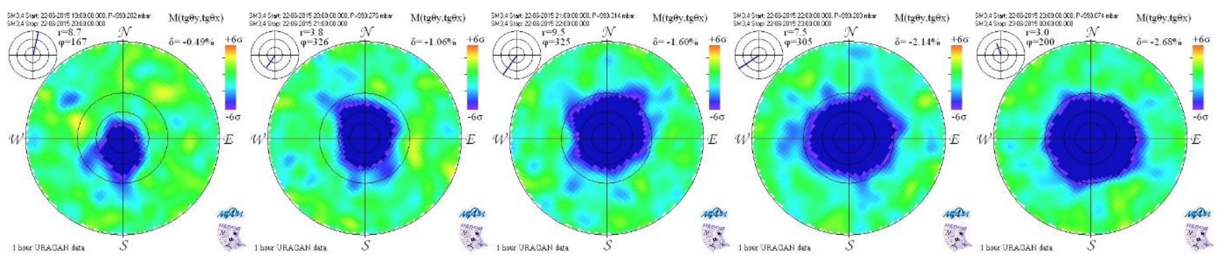


Рисунок 4.23. Мюонографии изменения потока мюонов во время ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года в период с 19:00 до 23:00 UTC

Как видно из мюонографий, в начале падения уменьшение потока мюонов наблюдается в угловом диапазоне до 30° с южного направления, затем падение охватывает диапазон углов до 60°.

На рисунке 4.24 представлены корреляции между проекциями вектора относительной анизотропии потока мюонов на направления север-юг и восток-запад.

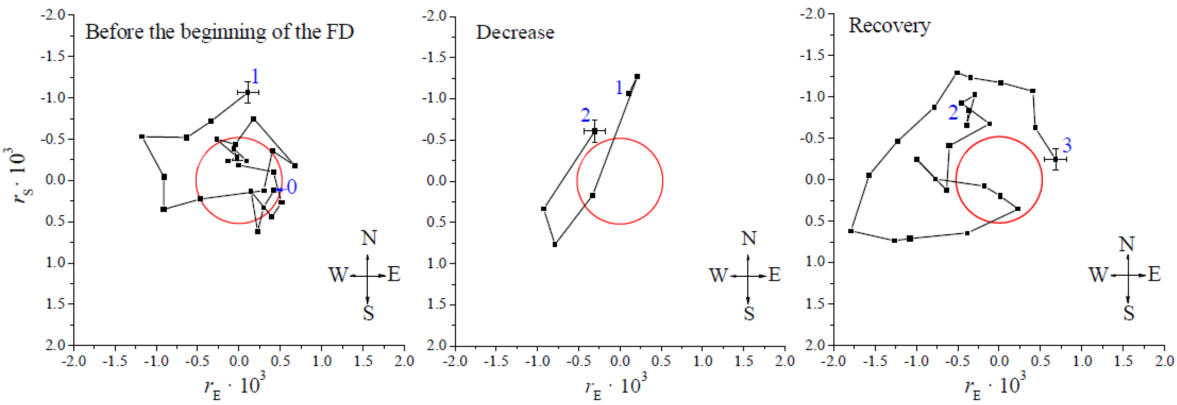


Рисунок 4.24. Корреляции между r_S и r_E для ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года в период с 19:00 до 23:00 UTC, на трех фазах развития события (типичные ошибки r_S и r_E показаны в точках 1, 2 и 3)

Видно, что это событие имело сильную анизотропию на всех фазах. На первой фазе наблюдается большая анизотропия с северо-западного направления, на второй фазе наблюдается движение с севера на юг и наоборот, а на фазе восстановления снова происходит движение в северо-западном направлении.

Таким образом, на примере одного из больших по амплитуде ФП, зарегистрированного 22 июня 2015 года, показано, что амплитуда этого ФП составляет около 2.4%, зависимость амплитуды от энергии первичных космических лучей дает «жесткий» спектр ($\alpha \approx -0.76$), амплитуда ФП для среднелогарифмической энергии первичных частиц более 25 ГэВ составляет около 2%, а также что данное ФП имеет сильную анизотропию на всех фазах.

4.4. Основные результаты и выводы главы 4

Таким образом, на основе мюонографии разработаны методы анализа форбуш-понижений, вызванных активными процессами на Солнце, а также получены следующие результаты:

- проведена оценка медианной жесткости солнечных протонов для мюонного годоскопа УРАГАН, которая дает значение около 5 ГВ;

– впервые получены мюонографии ФП, регистрируемых в годоскопическом режиме;
– проведен комплексный анализ 75 ФП, для каждого события составлены паспорта событий, которые включают интегральные, энергетические и пространственно-угловые характеристики ФП;
– на основе исследования зависимости амплитуды падения интенсивности потока мюонов от энергии первичных частиц в области 10 – 30 ГэВ получены энергетические характеристики ФП, которые хорошо согласуются со степенным характером энергетического спектра модуляции первичных космических лучей со средним показателем α = (-0.97 ± 0.41), показано, что значимой разницы между значениями α для фаз минимума и восстановления не наблюдается;
– не выявлено явных различий в среднем значении показателей спектров амплитуд ФП для трех типов гелиосферных возмущений (КВМ, КВМ с ударной волной и МО), однако показано, что характеристики форбуш-понижений, вызванных однотипными гелиосферными возмущениями, существенно различаются на фазах максимума и минимума солнечного цикла: для максимума солнечной активности средние значения показателя спектра амплитуд значительно выше по абсолютной величине, чем для минимума;
– исследованы закономерности в изменениях анизотропии потока мюонов во время ФП по азимутальным направлениям для разных фаз развития ФП (падения, минимума и восстановления), показано, что изменения относительной анизотропии вариаций потока мюонов наблюдаются в основном на фазах падения и минимума и в среднем соответствуют восточно-западной анизотропии первичных космических лучей.

ГЛАВА 5. МЮОНОГРАФИЯ ГЕЛИОСФЕРНЫХ И МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Исследования гелиосферных и магнитосферных процессов обычно проводятся с помощью детекторов, установленных на космических аппаратах и в наземных обсерваториях. За десятилетия эксплуатации космических аппаратов накоплен огромный экспериментальный материал и установлены различные взаимосвязи между процессами, происходящими на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере Земли, но полную картину влияния солнечной активности на Землю и околоземное космическое пространство создать пока не удалось. Информация, получаемая со спутников, носит точечный характер и ограничена положением детекторов в пространстве. Это не позволяет заблаговременно ответить на вопрос, окажет ли конкретный выброс влияние на геомагнитную обстановку в околоземном пространстве. Разработка новых методов анализа активных процессов на Солнце с помощью космических лучей открывает новые возможности для исследования возмущений в межпланетном и околоземном пространстве [61, 62, 66].

Не каждое событие, произошедшее на Солнце, влияет на радиационную, геомагнитную и электромагнитную обстановку в околоземном пространстве, то есть является геоэффективным [135]. Исследование влияния геоэффективных событий является важной частью анализа вариаций потока космических лучей, вызванных возмущениями в межпланетном пространстве [136, 137].

Для исследования гелиосферных и магнитосферных возмущений с помощью метода мюонографии, а также для сопоставления параметров, характеризующих состояние гелиосферы и магнитосферы, с параметрами вариаций потока мюонов была собрана информация о гелиосферных и магнитосферных возмущениях, отражающая интенсивность протекания активных процессов на Солнце, параметры околоземного пространства, геомагнитные возмущения, а также отклики в наземных детекторах космических лучей по данным нейтронных мониторов, которые сопоставлялись с данными годоскопа УРАГАН.

Мюонография позволяет изучать закономерности в анизотропии потока мюонов космических лучей, вызванной различными типами крупномасштабных возмущений солнечного ветра, в том числе корональными выбросами масс [138, 139]. Они представляют собой гигантские выбросы вещества из короны Солнца, которые наиболее часто происходят в годы максимума солнечной активности. В периоды «спокойного» Солнца интерес представляют потоки высокоскоростного солнечного ветра [140]. Проведение таких исследований направлено на оценку прогностического потенциала разрабатываемых методов [81,141].

5.1. Выявление геоэффективных и негеоэффективных событий

5.1.1. Параметры локальной анизотропии по время гелиосферных возмущений

Для надежной идентификации периодов увеличения анизотропии потока мюонов, вызванной развитием нестационарных процессов в околоземном пространстве, были получены статистические характеристики параметров локальной анизотропии потока мюонов. Так как величины r_h и σ_{rh} во время эксперимента весьма разнообразны, их значения для 2009 года, характеризующегося низкой солнечной активностью, были приняты в качестве основных параметров для оценки возмущений анизотропии потока мюонов. На рисунке 5.1 показано распределение значений проекции вектора относительной анизотропии за период с 1 сентября по 31 декабря 2009 года.

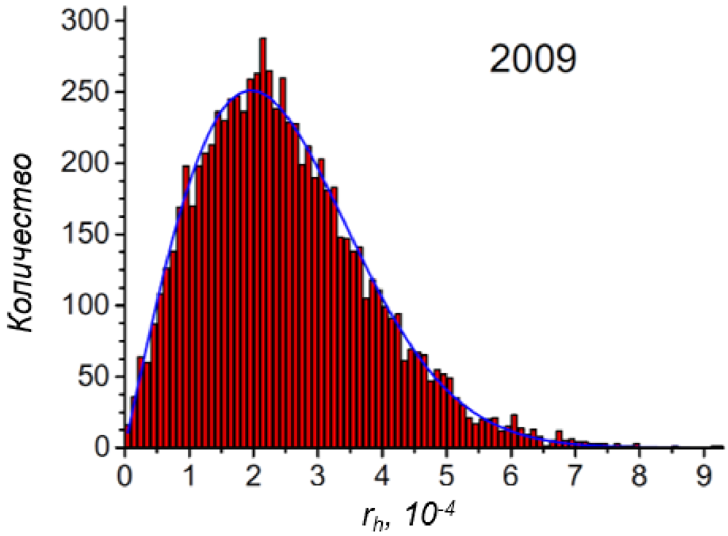


Рисунок 5.1. Распределение значений проекции вектора относительной анизотропии r_h в 2009 году

Распределение параметра r_h является суммой двух нормальных распределений проекций вектора относительной анизотропии r_x и r_y и соответствует распределению Рэлея [142]:

$$f\left(r_h, a\right) = \frac{r_h}{a^2} \exp\left(- \frac{r_h}{2a^2} \right), \tag{5.1}$$

среднее значение:

$$<r_h>=\sqrt{\frac{\pi}{2}}a \approx 1.253a, \tag{5.2}$$

дисперсия:

$$D(r_h)=\left(2-\frac{\pi}{2}\right)a^2 \approx 0.429a^2, \tag{5.3}$$

среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_{r_h} = \sqrt{D_{r_h}} = 0.655a. \tag{5.4}$$

Для 2009 года эти параметры имеют следующие значения: $a = 1.96 \times 10^{-4}$, $r_h = 2.45 \times 10^{-4}$, $D(r_h) = 1.65 \times 10^{-8}$ и $\sigma_{rh} = \sqrt{D_{rh}} = 1.28 \times 10^{-4}$. Из определения вектора локальной анизотропии следует, что его длина имеет значение порядка 1, длина вектора относительной анизотропии составляет ~10^{-3}, а характерные значения его горизонтальных проекций составляют ~10^{-4}. Таким образом, мюонный годоскоп практически в режиме реального времени позволяет измерять относительные отклонения зенитно-азимутальной зависимости потока мюонов космических лучей на уровне десятых и сотых долей процента.

Вклад влияния солнечной активности в распределение на рисунке 5.1 был оценен двумя способами. Во-первых, оценен путем сравнения распределения Рэлея для данных одного и трех супермодулей (соотношение статистик 1:3). В чисто статистическом случае ширина распределения должна была уменьшиться в $\sqrt{3} \approx 1.73$ раза, но она уменьшилась всего в 1.3 раза. Это означает, что вклад солнечных возмущений соответствует как минимум половине эффекта. Во-вторых, оценен путем прямого вычисления дисперсий A_X и A_y проекций вектора $\vec{A}$ для массива часовых данных. Для одночасовой статистики в 15 миллионов событий минимальное значение σ_{rh}, связанное со статистикой, составляет $0.6 \times 10^{-4.}$ Это минимальное значение следует сравнить со значением 1.28×10^{-4}, полученным для распределения на рисунке 5.1. Таким образом, оба метода дают 50% вклада солнечной активности и статистической надежности [81].

Полученное значение среднеквадратичного отклонения, составляющее 1.28×10^{-4}, использовалось для оценки значимости отклонения r_h от среднего значения $<r_h>$. Для этого все значения r_h делились на эту величину: r_h/σ_{rh}. На рисунке 5.2 представлено распределение интегральной вероятности случайной величины r_h/σ_{rh} для 2009 года (вертикальной линией отмечено среднее значение). Из рисунка следует, что для значений r_h/σ_{rh}> 5 вероятность случайного отклонения составляет менее 1%.

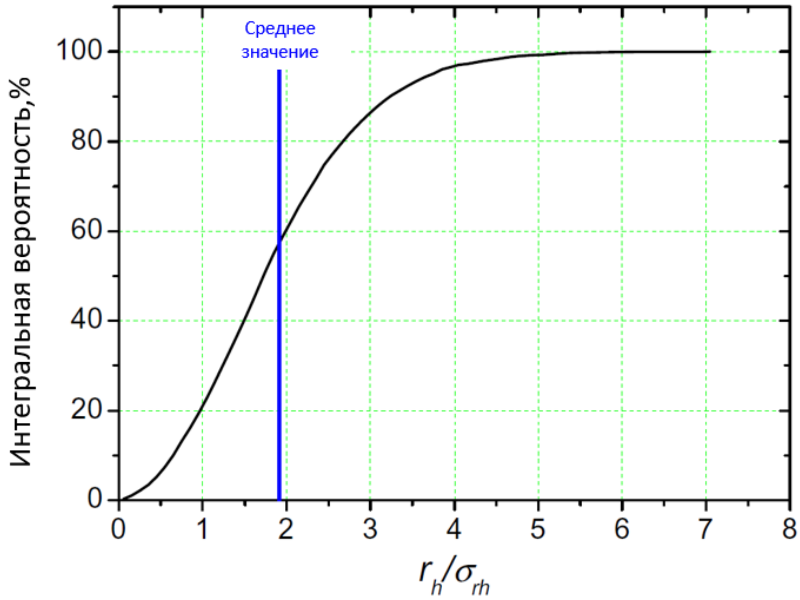


Рисунок 5.2. Распределение интегральной вероятности случайной величины r_h/σ_{rh} для 2009 года

5.1.2. Корональные выбросы масс 17 и 23 июля 2012 года

Наиболее мощными и интересными возмущениями в межпланетном магнитном поле в 24-м солнечном цикле, вызванными корональными выбросами, стали события, произошедшие в июле 2012 года. В этот период произошла серия вспышек и крупномасштабных корональных выбросов массы, источником которых стало пятно 1520. Первая солнечная вспышка класса X, которая была ориентирована на Землю, произошла 12 июля. Она вызвала сильные возмущения в магнитосфере Земли 14 июля 2012 года. Особый интерес представляют последующие события в той же области Солнца, которые не имели геоэффективности, поскольку пятно 1520 переместилось на противоположную сторону от Земли. Первый негеоэффективный КВМ произошел 17 июля 2012 года после вспышки М-класса и был зарегистрирован космическим аппаратом SOHO. Второй КВМ произошел 23 июля и был зарегистрирован космическим аппаратом STEREO-A. Скорость КВМ 23 июля была около 3000 км/с [143, 144]. Оба выброса не были ориентированы на Землю и не оказали на нее влияния.

КВМ 17 июля произошел после вспышки, зарегистрированной космическим аппаратом SOHO в точке Лагранжа L1 в 17:15 UTC. На рисунке 5.3 представлен снимок по данным моделирования iSWA (iNTEGRATED SPACE WEATHER ANALYSIS SYSTEM)

[145] в момент времени 20 июля 2012 года в 12:00 UTC. На снимке отмечены планеты (Земля, Марс, Меркурий и Венера), а также места расположения космических аппаратов STEREO-A и -B. Видно, что Венера находится в секторе прохождения КВМ, а Земля – на границе секторов, поэтому КВМ мог оказать влияние на околоземное пространство только периферийной частью.

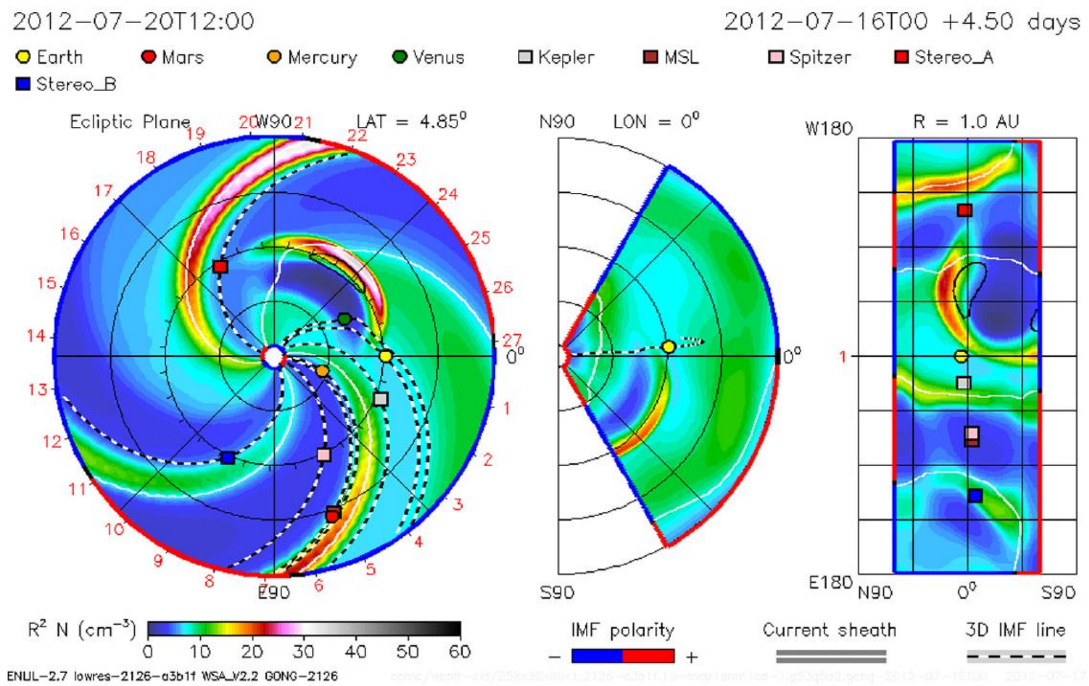


Рисунок 5.3. Снимок моделирования по данным iSWA (20 июля 2012 года в 12:00 UTC)

Вылет коронального выброса массы 23 июля был зарегистрирован в 02:08 UTC космическим аппаратом STEREO-A [143]. Снимок от 24 июля 2012 года в 12:00 UTC, показан на рисунке 5.4. В это время КВМ достиг орбиты Земли. Стоит отметить, что только STEREO-A находился в этом секторе гелиосферы, а другие спутники и планеты Солнечной системы находились в противоположных секторах. Фронт КВМ направлен в противоположную от Земли сторону. Выброс покинул зону наблюдения 27 июля 2012 года.

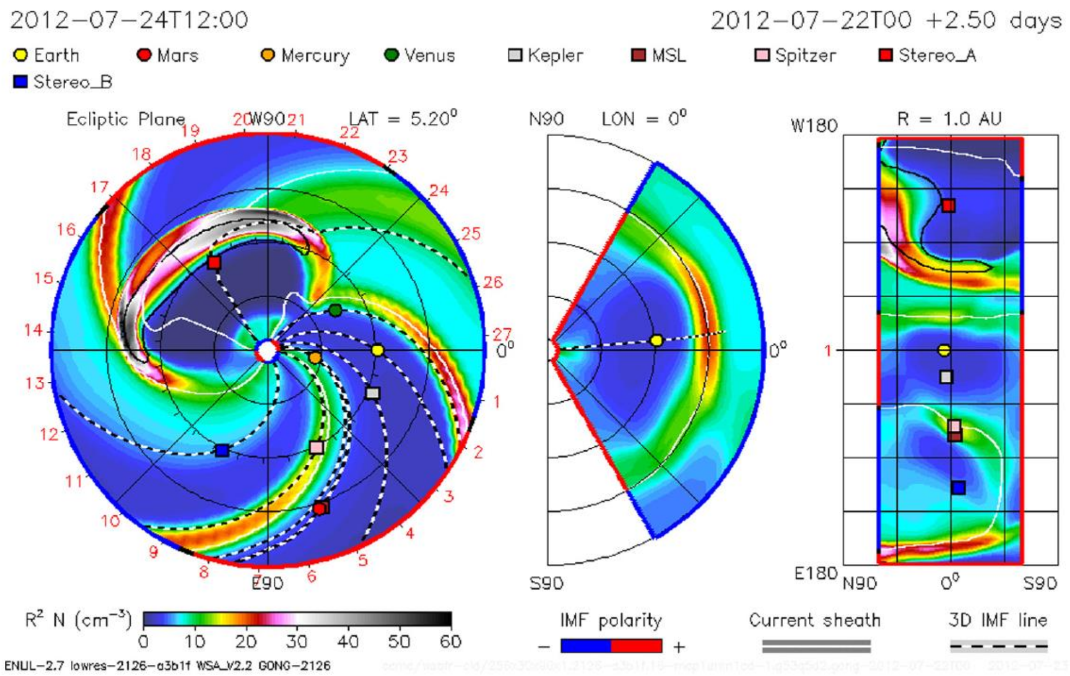


Рисунок 5.4. Снимок моделирования по данным iSWA (24 июля 2012 года в 12:00 UTC)

Данные о возмущении межпланетного магнитного поля, параметрах солнечного ветра и геомагнитной активности [95] представлены за период с 10 июля по 10 августа на рисунке 5.5. Магнитная буря (*Kp*> 6, *Dst*<100 нТл), вызванная солнечной вспышкой 12 июля, наблюдалась 14 – 15 июля. Периоды последующего КВМ, произошедшего после перехода пятна на другую сторону от Земли, отмечены вертикальными линиями. Из рисунка следует, что в этот период сильные возмущения в околоземном космическом пространстве и магнитосфере отсутствуют.

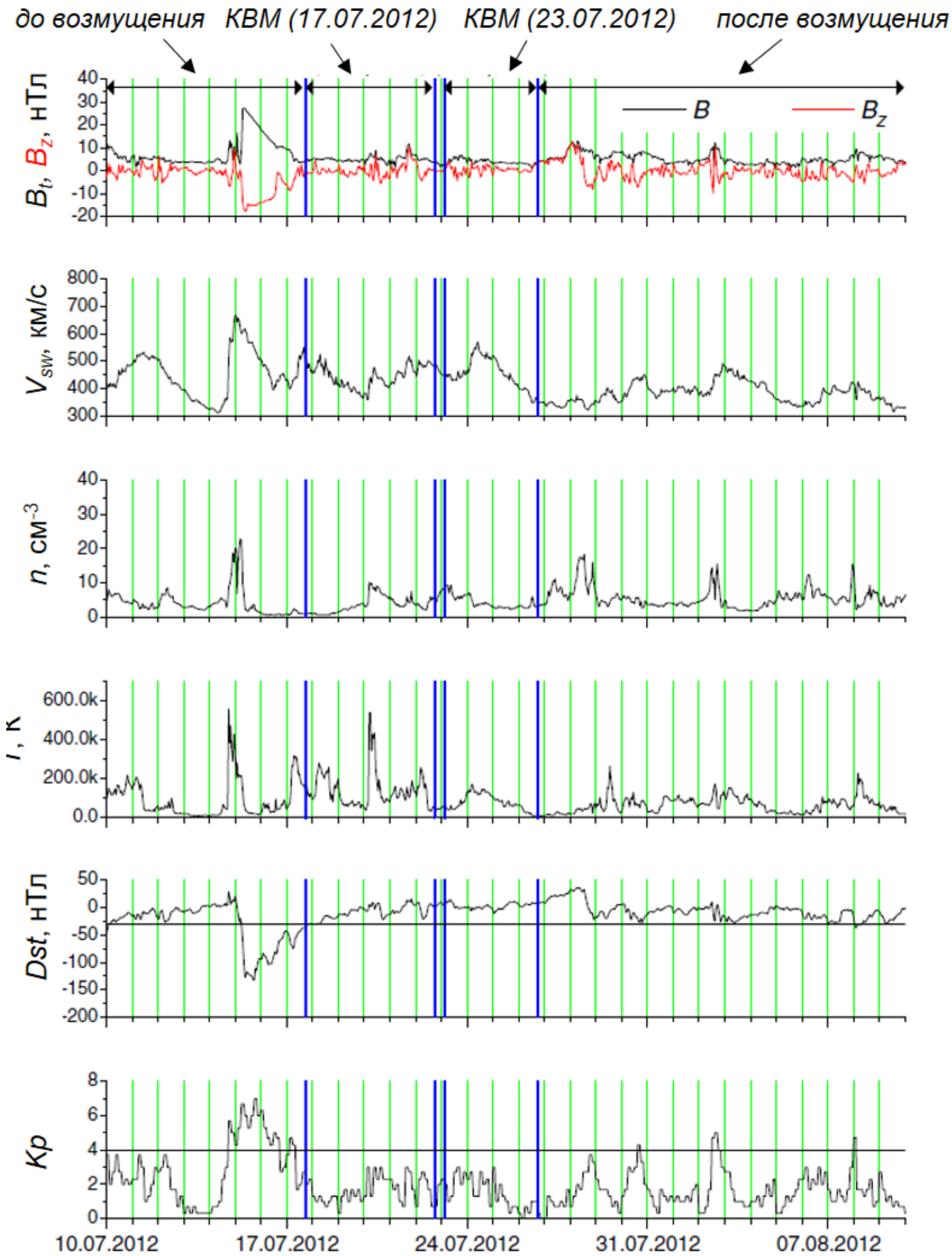


Рисунок 5.5. Параметры околоземного космического пространства и магнитосферы Земли. Сверху вниз: индукция магнитного поля (B_t; B_z), скорость, плотность и температура солнечного ветра, индексы геомагнитной активности Dst и Kp

Несмотря на негеоэффективный характер, анализируемые события оказали влияние на поток космических лучей, регистрируемый на поверхности Земли. На рисунке 5.6 показаны временные вариации интегральной скорости счета космических лучей, зарегистрированные мюонным годоскопом УРАГАН (вверху) и московским нейтронным монитором (внизу).

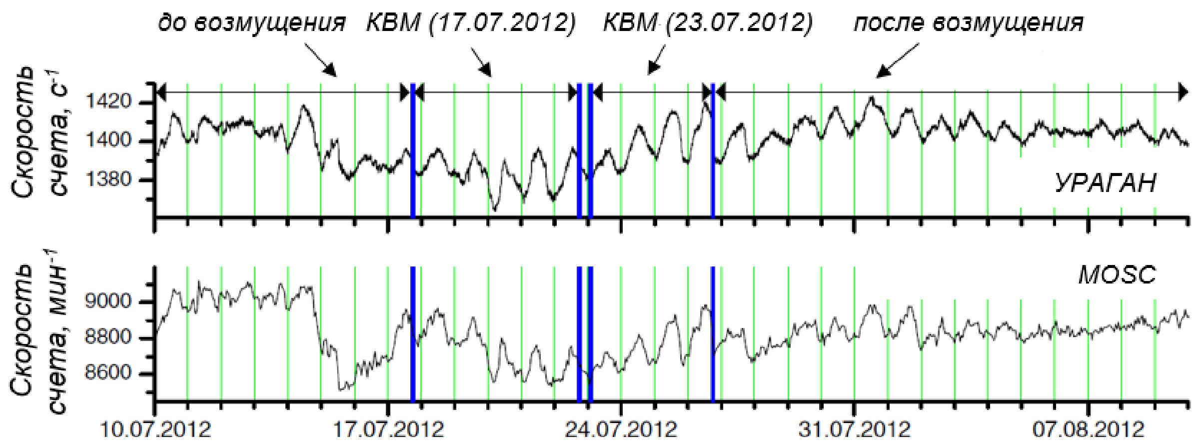


Рисунок 5.6. Скорость счета мюонного годоскопа УРАГАН (вверху) и московского нейтронного монитора (внизу) за период с 10 июля по 10 августа 2012 года

Исследуемый период был разделен на четыре временных интервала: до возмущения (с 10 по 17 июля), время первого КВМ (с 17 по 22 июля), время второго КВМ (с 23 по 27 июля) и после возмущения (с 27 июля по 10 августа). Вертикальными линиями отмечены временные интервалы прохождения КВМ через гелиосферу. Вспышка 12 июля была направлена в сторону Земли (рисунок 5.5) и вызвала сильное форбуш-понижение потока космических лучей, которое произошло 14 – 15 июля. Амплитуда форбуш-понижения составила 1.79% в МГ УРАГАН и 6,04% в MOSC.

Во втором анализируемом интервале наблюдалось еще одно ФП, но с меньшей амплитудой. По данным МГ УРАГАН ФП происходило с 18:50 UTC 19 июля до 03:30 UTC 20 июля, а его амплитуда составила ~1%. По данным MOSC, ФП с амплитудой 2% наблюдалось с 18:20 UTC 19 июля до 03:30 UTC 20 июля. В последующий период с 20 по 27 июля скорость счета мюонного годоскопа и нейтронного монитора плавно восстанавливалась, включая период, когда произошел КВМ, зафиксированный 23 июля. Таким образом, КВМ 23 июля не повлиял на поток космических лучей, регистрируемый различными типами детекторов на поверхности Земли.

Однако в оба временных интервала наблюдались значительные вариации параметров локальной анизотропии. На рисунке 5.7 показаны временные вариации горизонтальной проекции вектора локальной анизотропии, фиксируемые с 10 июля по 10 августа 2012 года. На верхнем графике показаны часовые значения горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии, на нижнем – его среднесуточные значения. Пунктирные линии на обоих графиках соответствуют средним значениям соответствующих характеристик за период работы установки с 2007 по 2013 гг. Для часовых значений $<r_h/\sigma_{rh}>_{all}$ = 2.93 (при среднеквадратичном разбросе 1.82), для среднесуточного значения $<r_h/\sigma_{rh\_24}>_{all}$ = 2.91 (со среднеквадратичным спредом 1.07).

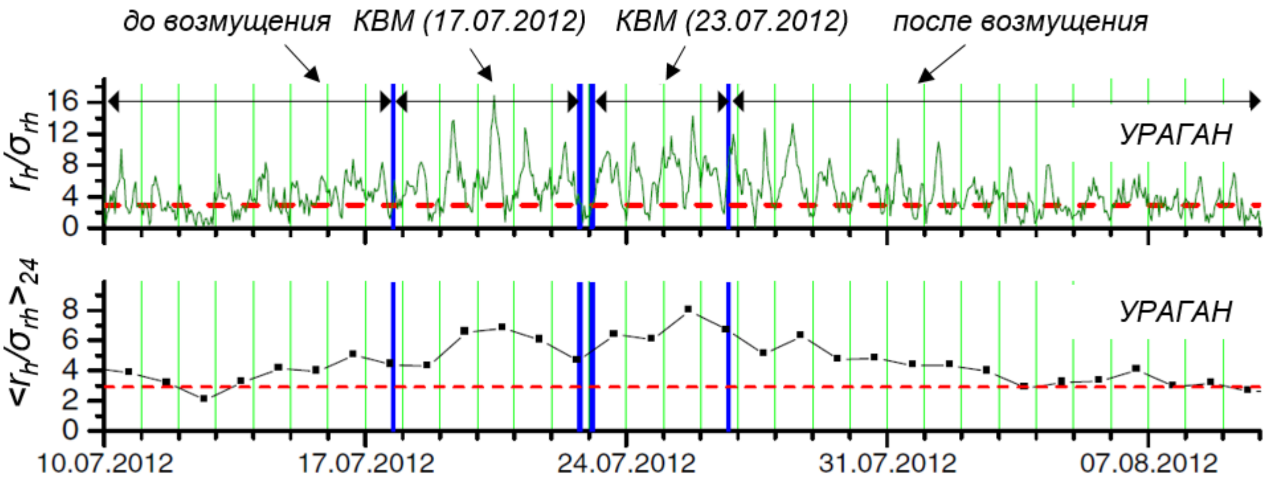


Рисунок 5.7. Часовые и среднесуточные вариации r_h/σ_{rh} с 10 июля по 10 августа 2012 года

Для каждого временного интервала рассчитывалось средние значения r_h/σ_{rh} и среднесуточного значения, а также их среднеквадратическое отклонение (СКО). Дисперсия этих значений характеризует скорость изменения r_h/σ_{rh}. Все данные представлены в таблице 5.1. Средние значения суточных и часовых значений r_h/σ_{rh} увеличиваются более чем в 1.5 раз во время возмущений. Разброс часовых значений также увеличивается в 1.5 и более раза. Для среднесуточных значений последняя тенденция не наблюдается из-за сглаживания в процессе усреднения.

Таблица 5.1. Средние значения r_h/σ_{rh} во время КВМ, зарегистрированного 17 и 23 июля 2012 года

Временной интервал	$<r_h/\sigma_{rh}>$	СКО $<r_h/\sigma_{rh}>$	$<r_h/\sigma_{rh\_24}>$	СКО $<r_h/\sigma_{rh\_24}>$
2007-2013	2.94	1.82	2.91	1.07
Перед возмущением	3.63	1.89	3.64	0.93
Во время КВМ (17.07.2012)	5.80	3.15	5.46	1.13
Во время КВМ (23.07.2012)	6.72	2.83	6.77	0.83
После возмущения	4.00	2.28	3.89	1.06

В таблице 5.2 показаны времена появления пиков значений относительной анизотропии и соответствующие им значения во время КВМ.

Таблица 5.2. Пиковые значения r_h/σ_{rh} во время *КВМ, зарегистрированного 17 и 23 июля 2012 года*

КВМ 17 июля 2012 года		КВМ 23 июля 2012 года	
Дата, время	Пиковое значение r_h/σ_{rh}	Дата, время	Пиковое значение r_h/σ_{rh}
-	-	23.07.2012 12:00	9.75
19.07.2012 09:00	13.69	24.07.2012 05:00	10.92
20.07.2012 11:00	16.89	25.07.2012 05:00	11.68
21.07.2012 07:00	12.72	25.07.2012 19:00	14.24
22.07.2012 09:00	10.92	26.07.2012 21:00	11.93

Появление первого и второго пиков в обоих случаях соответствует времени пересечения КВМ орбит Венеры и Земли соответственно. В первом случае пиковое значение значительно превышает значение, наблюдаемое во втором событии. Разница во времени появления пиков в первом случае составляет (24 ± 2) часа, во втором случае – (20 ± 4) часа. Это различие связано с тем, что КВМ, датируемый 23 июля, был намного мощнее и быстрее, чем событие, произошедшее 17 июля.

Таким образом, исследования показали, что, с одной стороны, во время КВМ, направленного к Земле, наблюдались резкие изменения в скорости счета наземных детекторов, но в то же время было зафиксировано отсутствие изменений углового потока мюонов распределения. С другой стороны, КВМ, направленные в противоположную от Земли сторону, оказали более существенное влияние на вариации локальной анизотропии потока мюонов, чем на изменение интегральной скорости счета.

5.1.3. Корональные выбросы масс, зарегистрированные 21 июня 2015 года

В качестве примера геоэффективного события рассмотрен корональный выброс, произошедший 21 июня 2015 года [137]. На рисунке 5.8 представлены снимки распределения потоков солнечного ветра в межпланетной среде по данным моделирования iSWA [145] от 21.06.2015 в 18:00 UTC и 22.06.2015 в 18:00 UTC соответственно. На рисунке видна вихревая структура солнечного ветра в межпланетном пространстве. Фронт выброса направлен в сторону Земли. Согласно базе данных CACTus [134] время начала выброса приходится на 02:48 UTC (погрешность определения старта ~2 ч), средняя скорость КВМ составляет 1213 км/с. Информация о КВМ формируется на основе анализа изображений солнечной короны, поступающих с коронографов LASCO C2/C3 космического аппарата SOHO и коронографов космических аппаратов STEREO-A и -B системы SECCHI. Вероятность автоматической идентификации выбросов по базе CACTus составляет 94% [146].

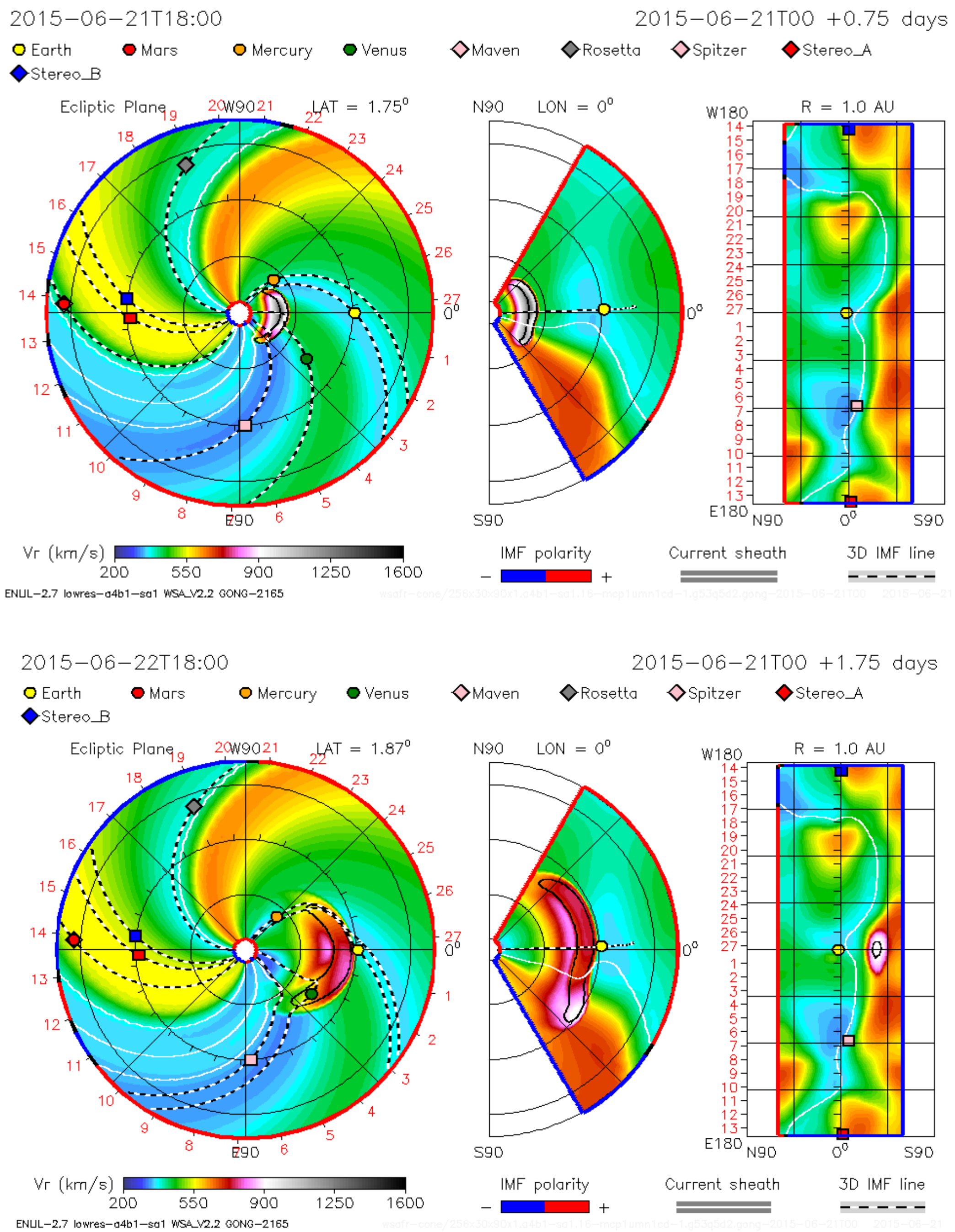


Рисунок 5.8. Распределение потока солнечного ветра в межпланетном пространстве согласно системе iSWA от 21.06.2015 в 18:00 UTC (вверху) и 22.06.2015 в 18:00 UTC (внизу)

Для определения геоэффективности события были рассмотрены данные о состоянии межпланетного магнитного поля по базе данных OMNI [95], представленные на рисунке 5.9. Вертикальными линиями отмечен промежуток времени, за который КВМ проходит расстояние, равное 2 а.е. (соответствующее масштабу карт ISWA), рассчитанное по средней скорости КВМ из базы данных OMNI. На рисунке видно, что в этот промежуток времени наблюдаются значительные изменения параметров: модуль межпланетного магнитного поля достигает 40 нТл, скорость солнечного ветра – 700 км/с, индекс геомагнитной индукции *Kp* = 8, *Dst* = -204 нТл. Таким образом, эту бурю согласно работе [147] можно классифицировать, как очень сильную. Для сопоставления изменений временных параметров на двух нижних графиках на рисунке 5.9 представлены изменения интегрального темпа счета мюонного годоскопа УРАГАН и значений горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии.

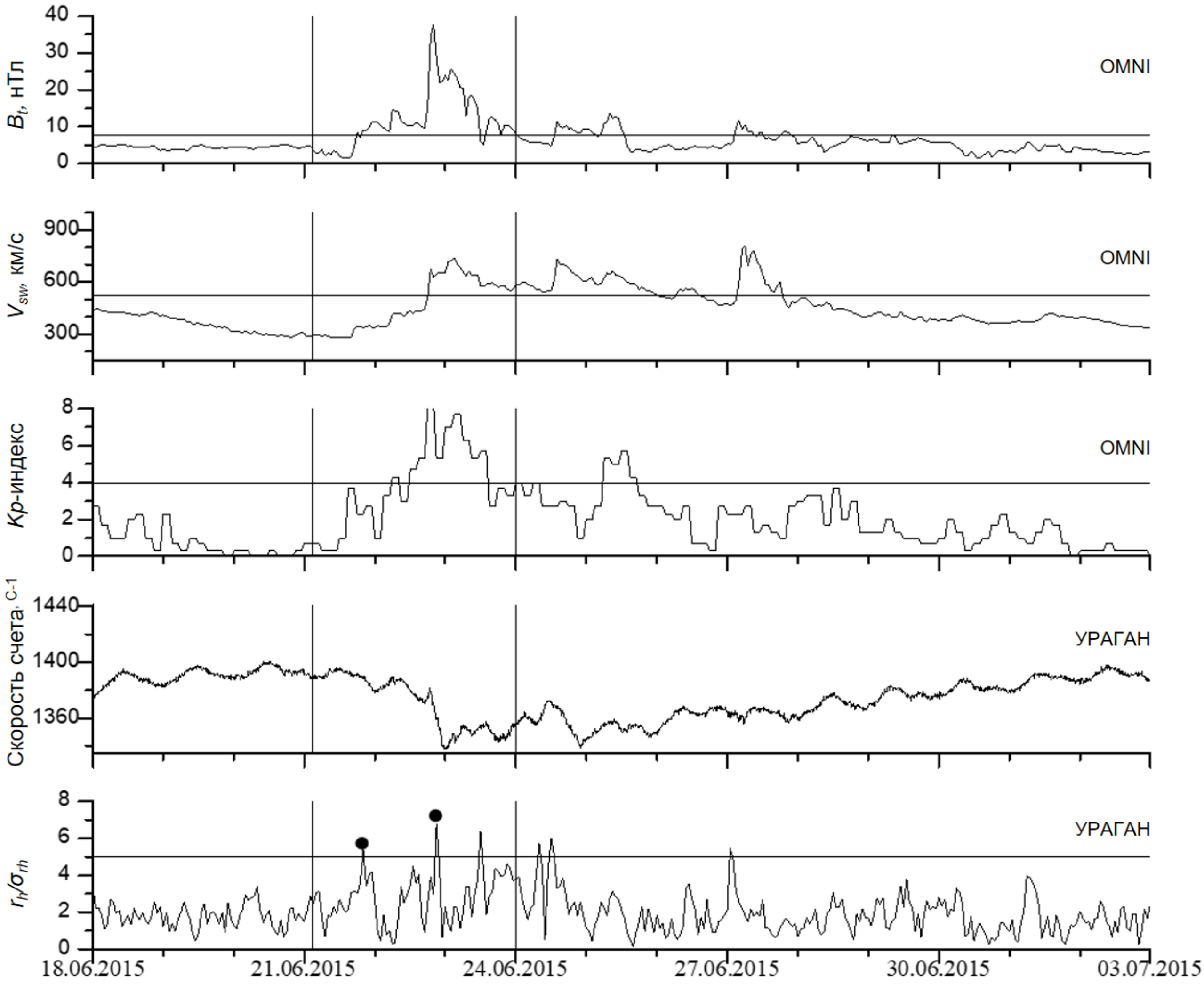


Рисунок 5.9. Временные изменения параметров B, V_{sw}, Kp-индекса, темпа счета мюонного годоскопа и параметра r_h/σ_{rh} за период с 18 июня по 3 июля 2015 года

При прохождении КВМ через межпланетное пространство, согласно iSWA (см. рисунок 5.8), по данным УРАГАН наблюдается резкое увеличение вариаций параметра r_h относительной анизотропии потока мюонов с пиковыми значениями, превышающими значение порога $r_h/\sigma_{rh} = 5$ [136]. На рисунке 5.9 черными точками отмечены моменты, соответствующие снимкам iSWA. Кроме того, во время данного события наблюдается сильный форбуш-эффект с амплитудой, составляющей ~2.7%.

Приведенные примеры показывают, что полученные с помощью метода мюонографии количественные характеристики анизотропии потока космических лучей являются хорошим инструментом изучения гелиосферных возмущений. Чтобы оценить эффективность метода анализа гелиосферных возмущений на достаточно большой статистике, по независимым источникам было проведено исследование гелиосферных и магнитосферных возмущений в период с 2007 по 2020 годы, результаты которого использовались для проверки отклика мюонного годоскопа на их появление. Также было проведено сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными близко расположенных нейтронных мониторов.

5.2. Исследование локальной анизотропии потока мюонов во время КВМ

На первом этапе было проведено исследование 26 корональных выбросов масс, которые произошли в период повышенной солнечной активности в 2014 и 2015 гг. [137]. В таблице 5.3 представлены данные этих событий. Для каждого события проведен анализ состояния гелиосферы и околоземного пространства по данным OMNI. В качестве геоэффективных событий рассматривались выбросы, у которых в заданный промежуток времени среднее значение индукции магнитного поля было более 6.2 нТл или средняя скорость солнечного ветра была более 460 км/с, а также наблюдалось возмущение хотя бы одного из индексов (Kp или Dst) геомагнитной индукции [138]. Временной интервал соответствует времени прохождения расстояния, равному двум астрономическим единицам (для расчета времени использовалась средняя скорость КВМ по данным CACTus). В итоге 12 событий из 26 были классифицированы как геоэффективные (в таблице отмечены «+»), при этом в 10 случаях наблюдаются значительные вариации локальной анизотропии ($r_h/\sigma_{rh} > 5$), шесть из которых сопровождаются форбуш-понижением с амплитудой более 1%.

Таблица 5.3 Список отобранных событий и отклик на них МГ УРАГАН

	Время начала КВМ	$<V_{КВМ}>$, км/с	$t_{2a.u.}$, сутки	$<B>$, нТл	$<V_{sw}>$, км/с	*Kp*-инд./ геоэфф		r_h/σ_{rh}	Амплитуда ФП, %
1	01.01.2014 18:24	1135	3.1	6.26	561	4	+	6.88	1.2
2	12.02.2014 5:48	287	12.1	7.19	378	4	+	3.90	–
3	18.02.2014 2:24	315	11	7.93	480	4	+	11.47	–
4	25.02.2014 1:25	504	6.9	3.99	376	3	–	4.47	–
5	02.04.2014 13:55	1840	1.9	5.05	388	2	–	3.34	–
6	18.04.2014 19:09	885	3.9	7.53	505	5	+	5.86	–
7	10.06.2014 13:09	1531	2.3	4.82	508	4	–	3.13	–
8	09.07.2014 18:36	503	6.9	5.51	365	2	–	4.24	–
9	15.08.2014 21:12	498	7	4.83	302	3	–	3.58	–
10	02.09.2014 17:00	419	8.3	5.1	389	3	–	5.19	–
11	10.09.2014 18:00	637	5.5	12.12	492	6	+	6.86	1.5
12	01.11.2014 5:12	675	5.1	4.23	462	3	–	5.41	–
13	19.12.2014 0:27	726	4.8	7.64	358	5	+	7.23	2.1
14	12.01.2015 15:36	1126	3.1	6.3	420	3	–	3.07	–
15	10.02.2015 3:03	512	6.8	5.77	355	3	–	3.82	–
16	10.03.2015 10:00	879	4	6.31	406	3	–	6.09	–
17	24.03.2015 10:40	722	4.8	4.83	510	3	–	3.69	–
18	04.04.2015 23:48	946	3.7	7.45	406	5	+	3.18	–
19	10.04.2015 7:00	502	6.9	8.21	360	5	+	5.76	–
20	19.04.2015 17:48	422	8.2	5.54	481	3	–	5.47	–
21	25.04.2015 15:12	520	6.7	4.45	313	2	–	5.41	–
22	21.06.2015 2:48	1213	2.9	9.99	383	6	+	6.77	2.7
23	25.06.2015 8:36	644	5.4	5.7	554	4	–	3.55	–
24	19.07.2015 19:09	591	5.8	6.4	326	2	+	5.20	1.1
25	22.08.2015 23:12	459	7.5	6.81	429	5	+	5.19	1.3
26	04.11.2015 14:24	466	7.4	9.9	536	6	+	6.03	–

Затем был проведён анализ данных, полученных мюонным годоскопом УРАГАН во время корональных выбросов масс, которые произошли в период с 2007 по 2018 гг. [138]. В этот период было рассмотрено 322 события. При отборе событий использовался подход, описанный в работе [148], т.е. в случае, если время начала между двумя последовательными КВМ было менее 12 часов, КВМ комбинировались в группу и рассматривались как единое событие, так как разделить влияние близких друг к другу КВМ на поток космических лучей не представлялось возможным.

В качестве примера на рисунке 5.10 представлены изменения скорости солнечного ветра, индукции межпланетного магнитного поля и Kp-индекса с 20 апреля по 15 мая 2011 года. Вертикальная линия t_0 – начало коронального выброса масс, зарегистрированного 24 апреля 2011 года. Для определения геоэффективности использовался метод, примененный в работе [97]. При расчете параметров для определения геоэффективности события рассматривается период времени Δt, который рассчитывается как разница между временем прохождения выброса расстояний 2 а.е. и 0.5 а.е. и временем начала КВМ t_0:

$$t_{2a.u.} = t_0 + \frac{2a.u.}{V_{CME}},\ t_{0.5a.u.} = t_0 + \frac{0.5a.u.}{V_{CME}} \qquad (5.5)$$
$$\Delta t = t_{2a.u.} - t_{0.5a.u.}$$

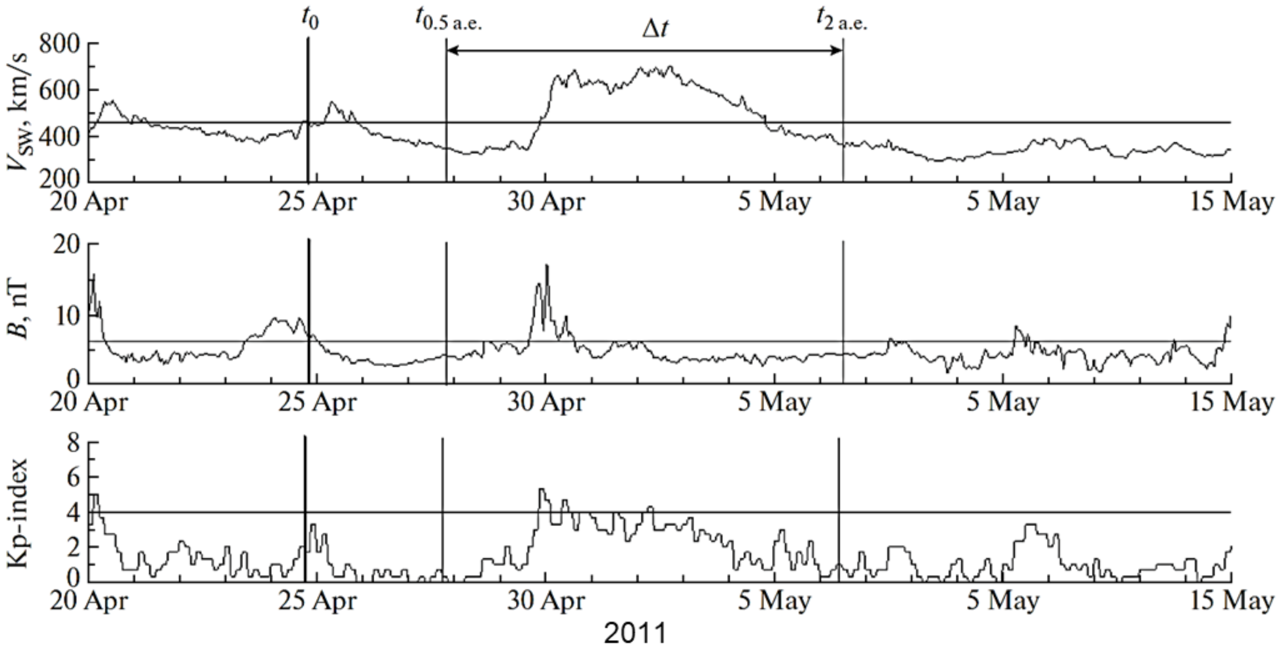


Рисунок 5.10. Параметры межпланетного поля и геомагнитной индукции в период с 20 апреля по 15 мая 2022 года

Средняя скорость КВМ, зарегистрированного 24 апреля 2011 года, по данным CACTus была 300 км/с. Из рисунка 5.10 видно, что данное событие можно классифицировать как геоэффективное, поскольку средняя скорость в отмеченный период составила 508 км/с, геомагнитный индекс Kp=5.

Из 322 рассмотренных событий 196 (61 ± 3)% были классифицированы как геоэффективные и 126 (39 ± 3)% как негеоэффективные. Наибольшее количество геоэффективных выбросов наблюдалось в 2012 и 2014 гг. – 43 и 39 событий соответственно, наименьшее – в 2017 году, за который произошло три геоэффективных КВМ. В период минимума солнечной активности, который пришелся на 2009 год, геоэффективных выбросов зафиксировано не было. Максимальное количество негеоэффективных КВМ произошло в 2013 году, а именно: 30 выбросов, минимальное – в 2009 году, в течение которого произошел всего один КВМ [138].

Для поиска отклика мюонного годоскопа УРАГАН на геоэффективные корональные выбросы масс был использован «Способ обнаружения гелиосферных возмущений» (патент РФ на изобретение № 2446495 от 27.03.2012) [67], который основывается на анализе мюонографий в GSE-системе.

Для анализа последовательности мюонографий в GSE была выработана методика выделения областей, в которых наблюдаются понижение и/или повышение интенсивности космических лучей на величину более ± 3 σ, т.е. наблюдаются деформации углового распределения потока космических лучей [139, 149]. На рисунках 5.11 и 5.12 представлены пример выделения области деформации углового распределения мюонов (с повышенной интенсивностью) в локальной системе координат и в GSE-системе. На правом рисунке дополнительными цветами отмечены выделяемые области, черной точкой обозначено максимальное изменение интенсивности в это области. В данном примере выделено три области, отмеченные фиолетовым, серым и розовым цветом.

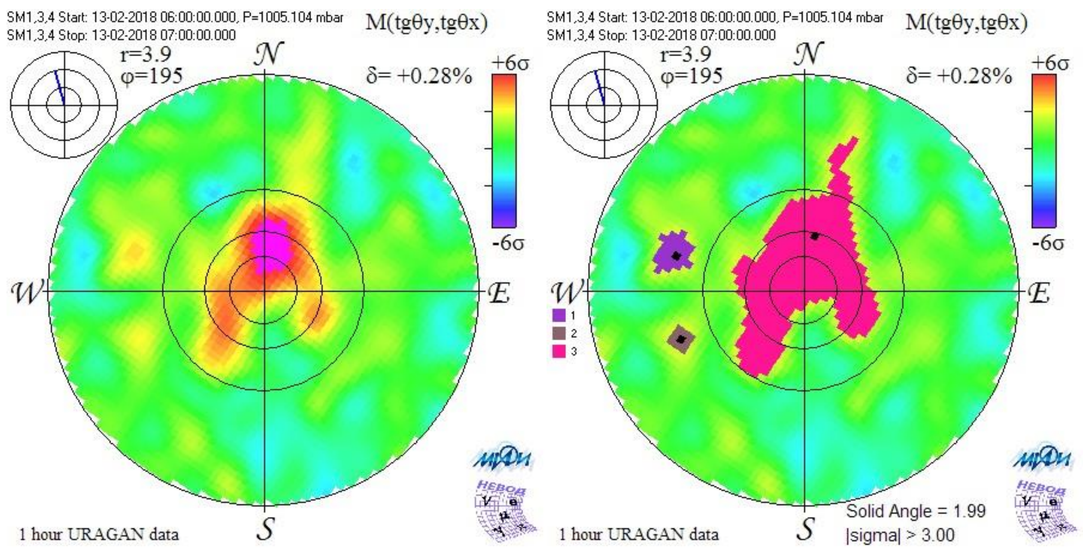


Рисунок 5.11. Часовая мюонография (слева) и мюонография с выделенными областями деформации углового потока (справа)

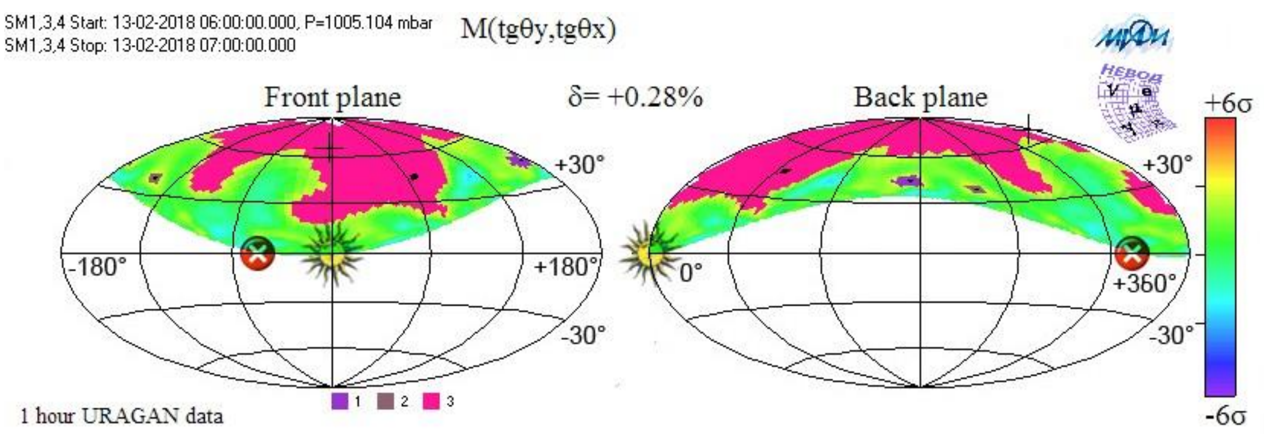


Рисунок 5.12. Часовая мюонография в GSE-системе с выделенными областями деформации углового потока

Для каждой выделенной области рассчитывается положение, размер области (телесный угол в стерадианах) и амплитуда изменения интенсивности космических лучей (в значениях σ), после чего формируется временная последовательность таких деформаций углового распределения. На рисунке 5.13 представлено распределение областей деформаций углового распределение по долготам в GSE-системе во времени за февраль 2018 года. Размер точки соответствует размеру области деформаций, а цвет – размеру отклонений в значениях сигмы [149]. Таким образом, данный метод позволяет исследовать динамику мюонографий в GSE-системе и изучать деформации углового распределения для гелиосферных возмущений.

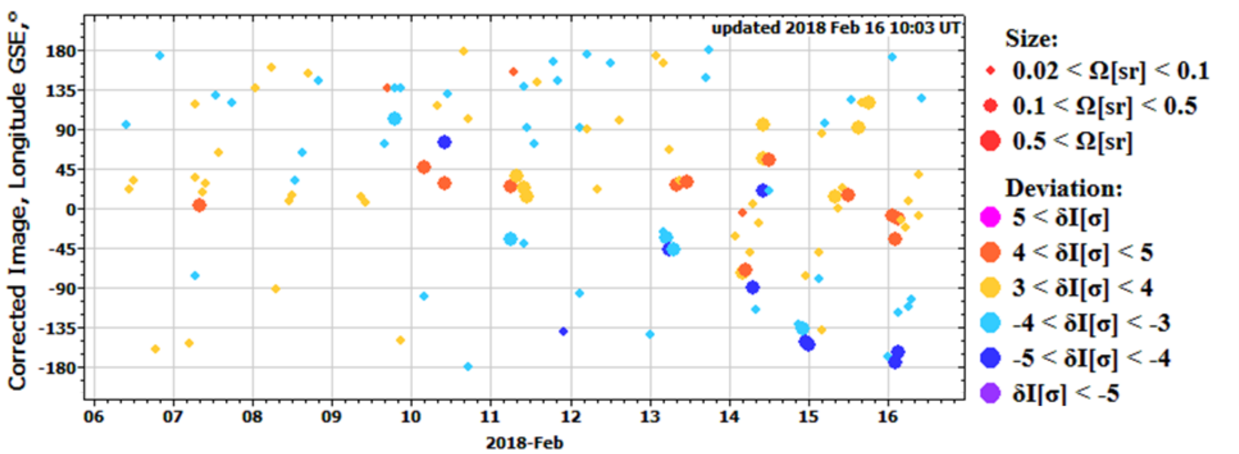
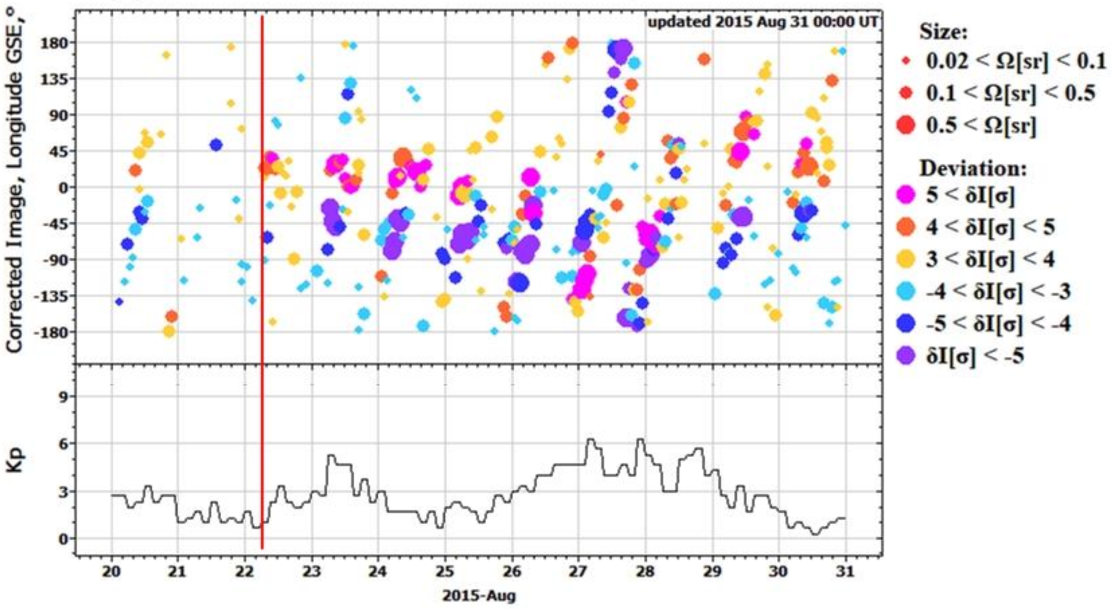


Рисунок 5.13. Распределение областей деформаций углового распределения по долготам во времени

На основе разработанных подходов был проведен анализ деформаций углового распределения на разных фазах солнечной активности в период с 2007 по 2020 гг. На рисунках 5.14 и 5.15 приведены примеры последовательностей областей деформаций углового распределения потока КЛ для геоэффективных и негеоэффективных событий в различные периоды солнечной активности (СА).

Геоэффективный КВМ 22.08.2015 в период повышенной СА



Геоэффективный КВМ 03.04.2010 в период пониженной СА

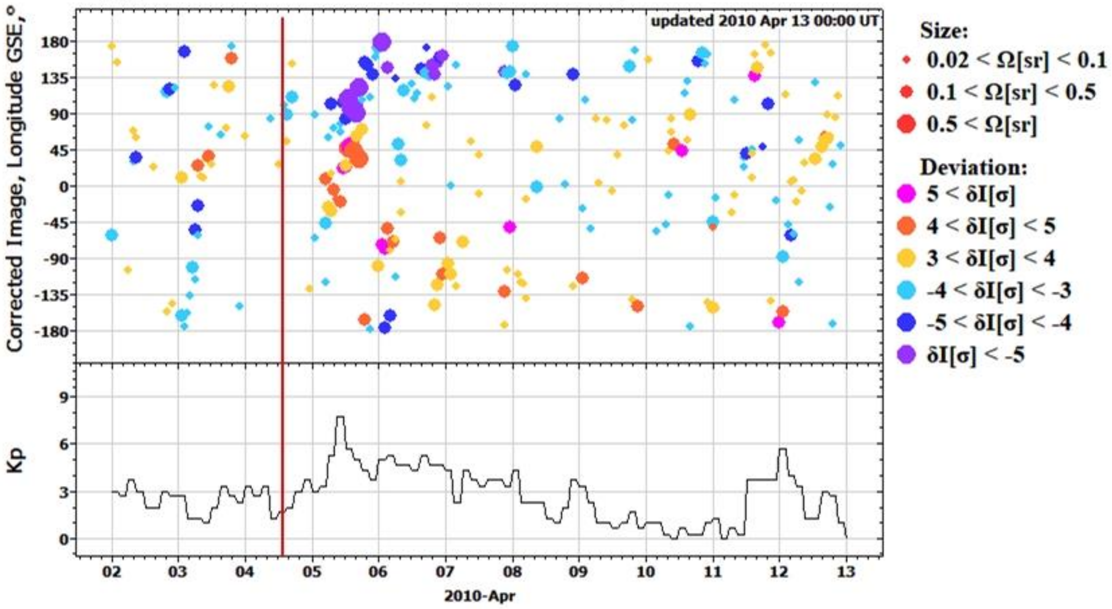
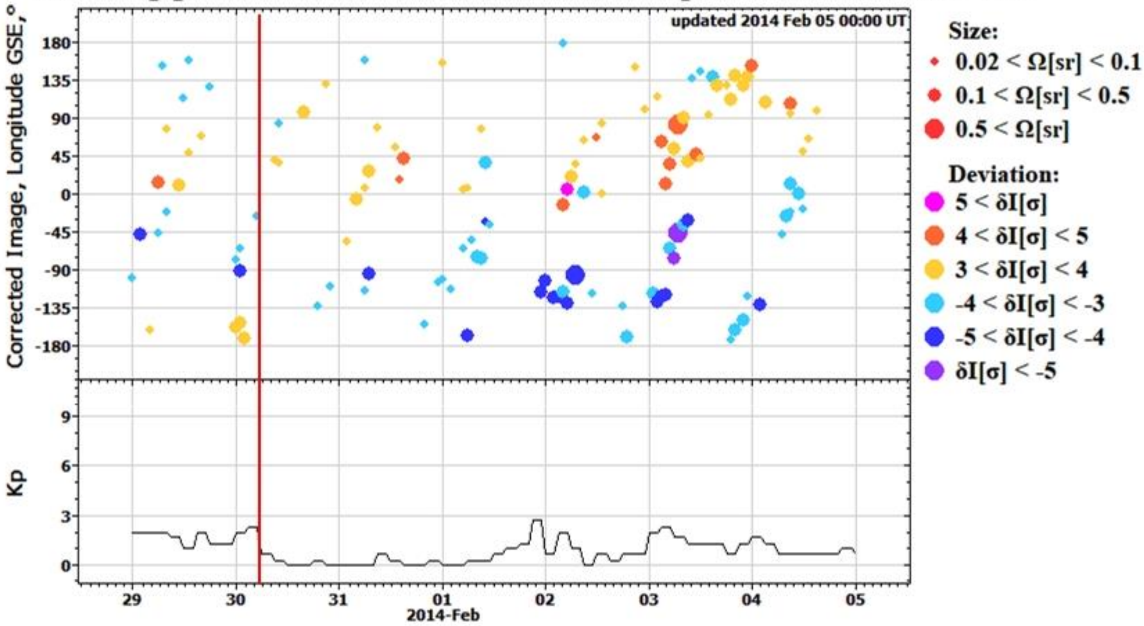


Рисунок 5.14. Распределение областей деформаций углового распределения по долготам во время геоэффективного КВМ в период повышенной (вверху) и пониженной (внизу) солнечной активности

Негеоэффективный КВМ 30.01.2014 в период повышенной СА



Негеоэффективный КВМ 14.08.2010 в период пониженной СА

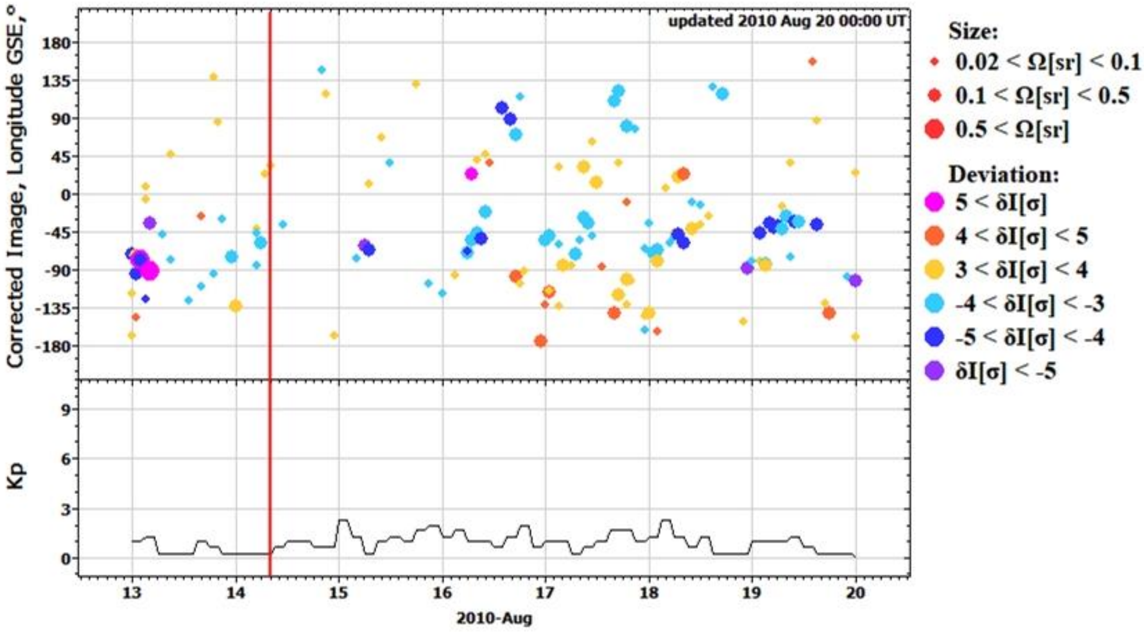


Рисунок 5.15. Распределение областей деформаций углового распределения по долготам во время негеоэффективного КВМ в период повышенной (вверху) и пониженной (внизу) солнечной активности

В ходе анализа таких событий был выявлен ряд закономерностей. Во-первых, в периоды низкой солнечной активности отклик мюонного годоскопа на геоэффективные события оказался наиболее выражен, количество отклонений повышено в коротком интервале (2 суток), повышения и понижения разделены по долготам. Во-вторых, в периоды высокой солнечной активности для геоэффективных событий отклонения потока от среднего не имеют четко выраженного распределения по долготам, количество отклонений повышено в широком интервале (4 – 6 суток), отклики на следующие друг за другом события сложно отделить друг от друга (см. рисунок 5.14). В-третьих, отклик на негеоэффективные КВМ как в периоды низкой, так и в периоды высокой солнечной активности имеет широкое распределение по времени, а именно: 4 – 6 суток. Количество областей деформации ниже, чем у геоэффективных событий (см. рисунок 5.15).

5.3. Анализ вариаций потока мюонов, вызванных высокоскоростным солнечным ветром в периоды низкой солнечной активности

В периоды, когда солнечная активность понижена, одной из причин возмущений межпланетного магнитного поля является высокоскоростной солнечный ветер, генерируемый в корональных дырах на Солнце. Как правило, такие процессы являются основными источниками магнитных возмущений на Земле в периоды низкой солнечной активности.

Было проведено исследование влияния высокоскоростного солнечного ветра на состояние магнитосферы, а также на поток космических лучей, регистрируемых на поверхности Земли мюонным годоскопом УРАГАН. Кроме того, были проанализированы параметры локальной анизотропии потока мюонов в периоды низкой солнечной активности во время геомагнитных возмущений, вызванных высокоскоростным солнечным ветром [140,141].

На рисунке 5.16 показаны вариации параметров межпланетного магнитного поля и геомагнитных индексов в периоды низкой солнечной активности, приходящиеся на 2008 – 2009 гг. и 2017 – 2018 гг. Видно, что параметры межпланетного пространства в эти периоды близки по своим значениям. В первом периоде среднее значение скорости солнечного ветра составляло (408 ± 104) км/с, во втором – (433 ± 99) км/с. В период с 2008 по 2009 гг. наблюдалось 39 магнитных бурь с $Kp \geq 4$, а в период с 2017 по 2018 гг. – 80. Большее количество бурь во второй период объясняется более высокой солнечной активностью.

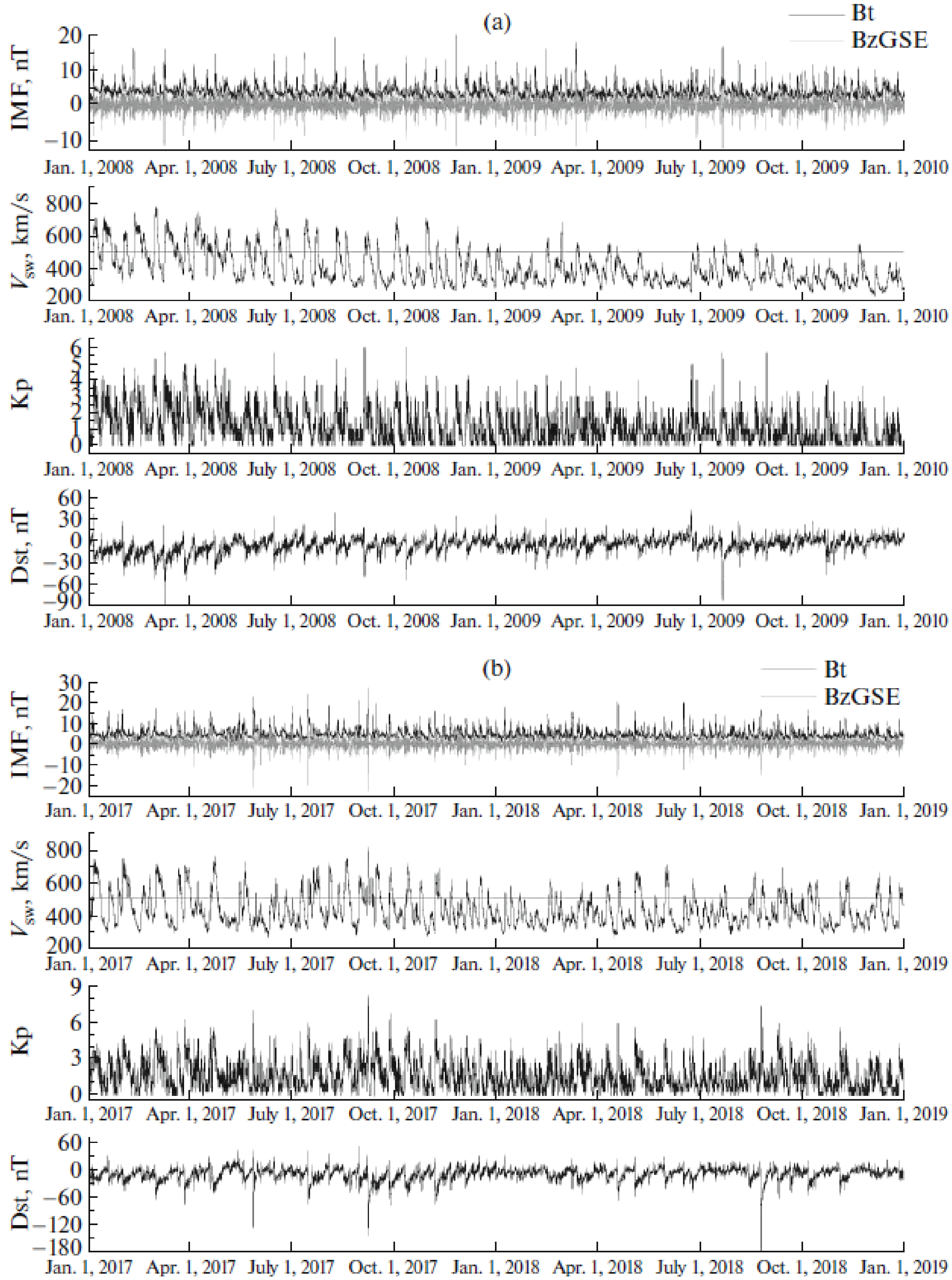


Рисунок 5.16. Вариации гелиосферных и геомагнитных параметров: индукция межпланетного магнитного поля и его Z-проекция, скорость солнечного ветра, Kp- и Dst-индексы для периодов с 2008 по 2009 гг.(а) и с 2017 по 2018 гг.(б) [140]

Основным критерием отбора событий для дальнейшего анализа был критерий превышения скорости солнечного ветра V_{SW} значения в 500 км/с. При этом превышение не должно было быть вызвано корональным выбросом масс. Для таких событий в рассматриваемом временном интервале было проанализировано поведение вектора магнитной индукции *B* и его проекции на ось z. Для оценки геомагнитной обстановки учитывались индексы геомагнитной активности *Kp* и *Dst*.

На рисунке 5.17(а) показаны области усиления высокоскоростного солнечного ветра (> 500 км/с), в которых увеличение вектора магнитной индукции было зарегистрировано 11 – 13 августа и 16 – 18 августа 2017 года. В первый период возрастание скорости солнечного ветра и возмущение в магнитосфере Земли не наблюдались. Во время второго периода наблюдалась магнитная буря (максимальное значение *Kp* = 5, *Dst* < -30 нТл), начавшаяся одновременно с началом возрастания скорости солнечного ветра.

На рисунке 5.17(б) показаны временные ряды параметров анизотропии потока мюонов в рассматриваемые периоды. Видно, что в анализируемые периоды наблюдаются изменения параметров r_h, σ_{rh}, σ_{rS} и σ_{rE}. Следует обратить внимание на то, что изменения были зафиксированы до начала анализируемого возмущения гелиосферы. Превышение заданного порогового значения параметром σ_{rS} наблюдалось за 24 часа до начала возмущения (11.08.2017 в 06:00 UTC). Изменения горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии r_h выходят за пределы порогового значения примерно за три дня до того, как скорость солнечного ветра превысила значение в 500 км/с. Во время второго периода (17 – 22 августа 2017 года) максимальное значение скорости солнечного ветра (V_{max} = 750 км/с) было зарегистрировано 20.08.2017 в 2:00 UTC. Отметим, что анизотропия потока мюонов была зарегистрирована ранее: параметры σ_{rh}, σ_{rE} превысили пороговые значения 18.08.2017 в 8:00 UTC и в 10:00 UTC соответственно, т.е. примерно двумя днями ранее, чем солнечный ветер достиг максимальной скорости в районе наблюдения.

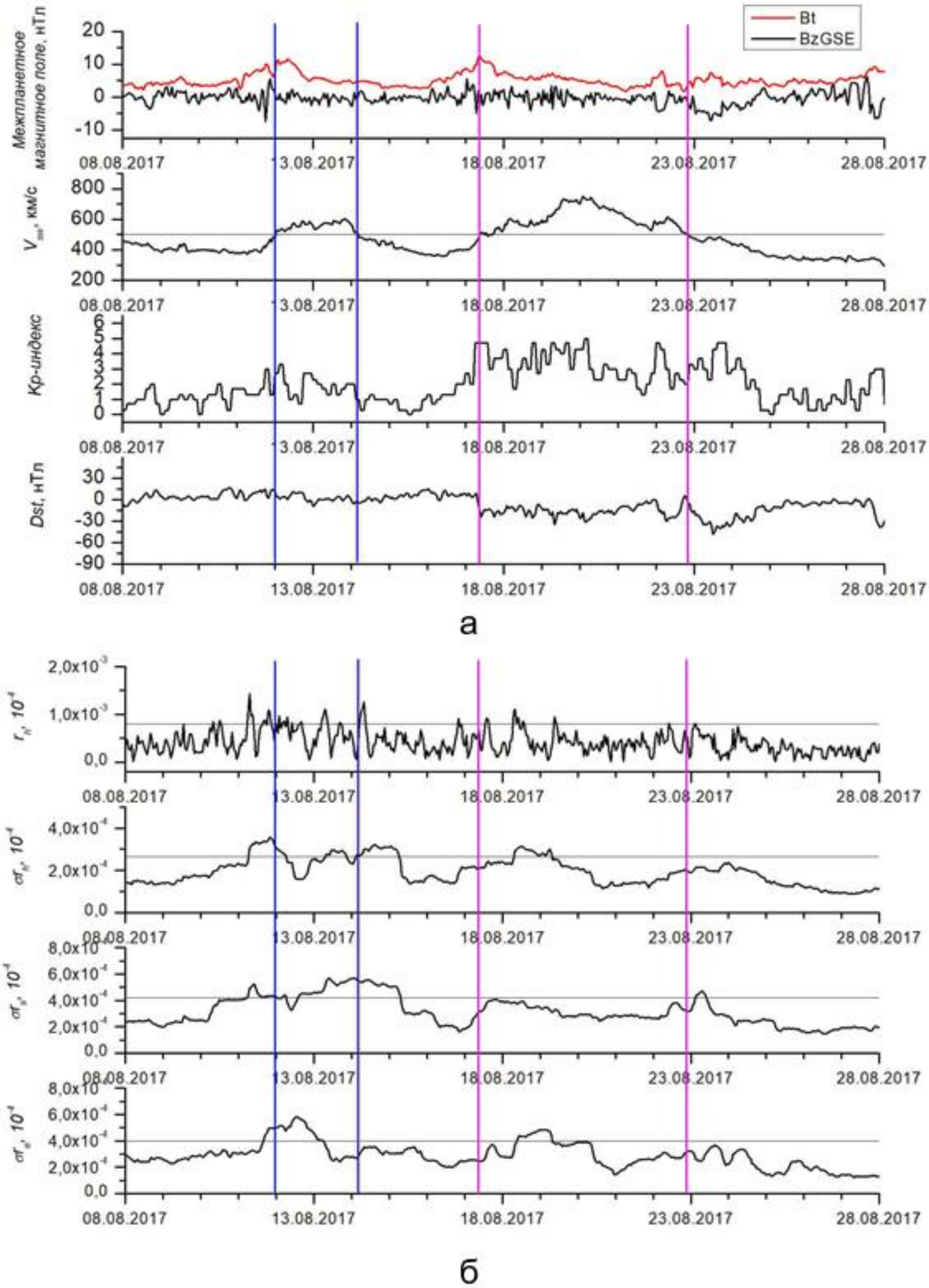


Рисунок 5.17. Вариации вектора магнитной индукции, скорости солнечного ветра и геомагнитных индексов Кр и Dst (а) и параметров относительной локальной анизотропии потока мюонов (б) по данным мюонного годоскопа УРАГАН для событий, зарегистрированных в августе 2017 года. Вертикальные линии показывают интервалы, анализируемые в тексте

В результате в периоды с 2008 по 2009 гг. и с 2017 по 2018 гг. было отобрано 58 событий, когда наблюдалось возрастание скорости солнечного ветра более чем в 500 км/с при условии отсутствия корональных выбросов массы. Возмущение магнитосферы было отмечено только во время протекания 47 отобранных событий. По данным МГ УРАГАН, параметры относительной анизотропии потока мюонов превышали пороговые значения в 89% случаев, что составило 42 события (таблица 5.4).

Таблица 5.4. Количество событий, обнаруженных по первому превышению порогового значения одного из параметров σ_{rh}, σ_{rS}, σ_{rE} за 2008, 2009, 2017 и 2018 гг.

Год	Количество событий	σ_{rh}	σ_{rS}	σ_{rE}
2008	7	1	5	1
2009	5	2	3	0
2017	14	3	7	4
2018	16	3	8	5

Исследование влияния высокоскоростного солнечного ветра на поток космических лучей, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН в периоды минимумов солнечной активности с 2008 по 2009 гг. и с 2017 по 2018 гг., показало, что во время (54 ± 8) % событий параметр σ_{rS} реагировал на возмущение солнечного ветра ранее, чем параметры σ_{rh} и σ_{rE}.

На рисунке 5.18 представлена последовательность деформаций углового распределения по результатам анализа мюонографий в системе GSE в период с 8 по 28 августа 2017 года. В нижней части рисунка показано изменение Kp-индекса. В первый анализируемый период, приходящийся на 12 – 14 августа 2017 года, выделяются области более 0.5 ср, в которых увеличение потока на > 5σ наблюдается в диапазоне углов от 0° до +90°, уменьшение потока на < 4σ – в диапазоне углов от -90° до 0°. Второй период, приходящийся на 17 – 23 августа 2017 года, оказался очень похож на первый. В этот период характерные участки увеличения потока космических лучей на уровне > 5σ в диапазоне углов от 0° до +90° наблюдаются за два дня до регистрации максимальной скорости солнечного ветра.

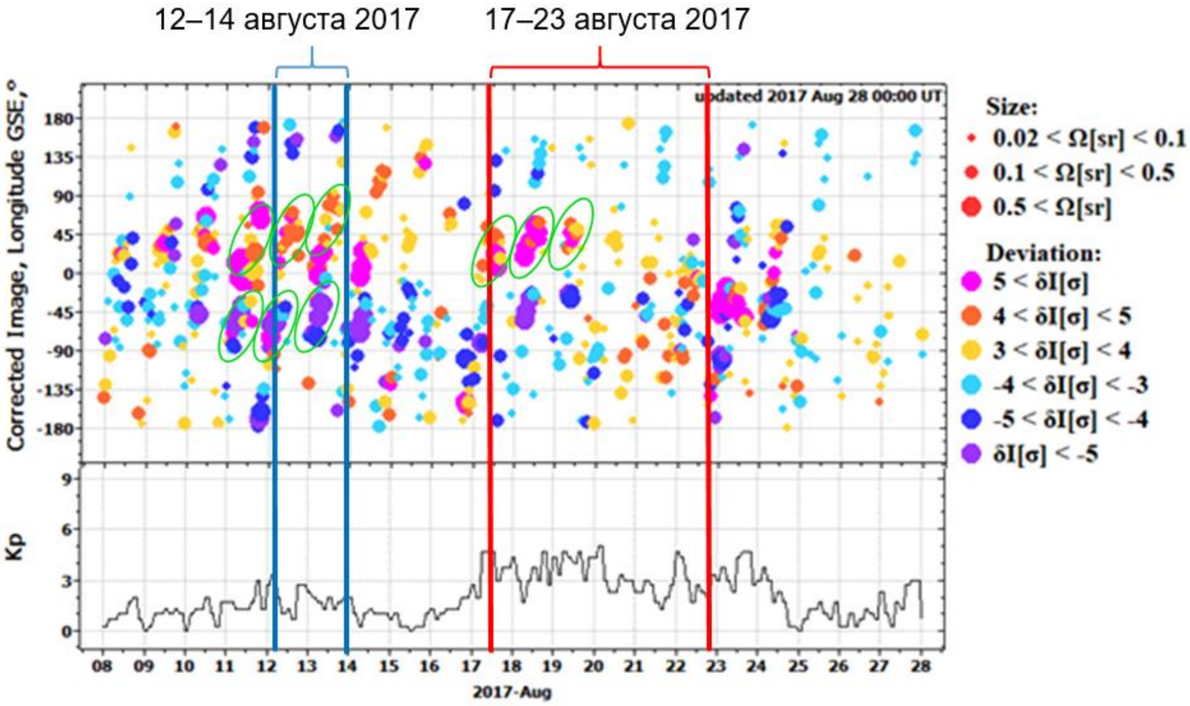


Рисунок 5.18. Последовательность деформаций углового распределения для мюонографий в системе GSE за период с 8 по 28 августа 2017 года. Вертикальными линиями показаны анализируемые в тексте интервалы

Важной задачей является изучение прогностического потенциала определения критериев раннего прогнозирования геомагнитных возмущений, вызванных корональными дырами. Рассматривались периоды пониженной активности Солнца, приходящиеся на 2008 – 2010 гг. и 2017 – 2019 гг. За эти периоды на Земле произошло 136 магнитных бурь. Из них 112 бурь возникли в результате воздействия высокоскоростного солнечного ветра на магнитосферу Земли. Для каждого события были проанализированы области пониженной и повышенной интенсивности потока мюонов космических лучей в мюонографиях в GSE-системе. Ниже приведен пример такого анализа.

С 27 августа 2019 года на видимом диске Солнца находились две корональные дыры. Одна из них, характеризующаяся как контрастная, положительной полярности, пересекла центральный меридиан 28 августа. Возмущение геомагнитного поля Земли от нее регистрировалось с 31 августа по 02 сентября на всех широтах, а также 30 августа и 03 сентября в отдельные часы на средних широтах и в течение суток на высоких широтах. Эта дыра являлась источником высокоскоростного солнечного ветра, ставшего причиной возмущения в межпланетном пространстве и магнитосфере Земли.

На рисунке 5.19 приведены параметры межпланетного магнитного поля и индекс геомагнитной активности. На верхнем графике видно, что возмущение индукции межпланетного магнитного поля B_t началось утром 30 августа в 05:00 UTC после прихода корональной дыры в геоэффективные долготы. Начало возмущения скорости солнечного ветра V_{sw} было зарегистрировано 30 августа в 20:00 UTC. На нижнем графике приведен индекс геомагнитной активности *Kp*. Магнитная буря (*Kp*> 4) на Земле началась 31.08.2019 в 02:00 UTC. Максимального значения индекс геомагнитной активности достиг 31.08.2019 в 13:00 UTC. Синими точками на графиках отмечены области понижения потока КЛ, оранжевыми – его повышение на 4*σ*. Сверху приведены примеры мюонографий. Первое понижение потока КЛ было зарегистрировано 30.08.2019 в 03:00 UTC. Повышение потока КЛ было зафиксировано 30.08.2019 в 10:00 UTC. На протяжении двух последующих суток в потоке КЛ присутствовали области повышения и понижения интенсивности потока больше 3σ [150].

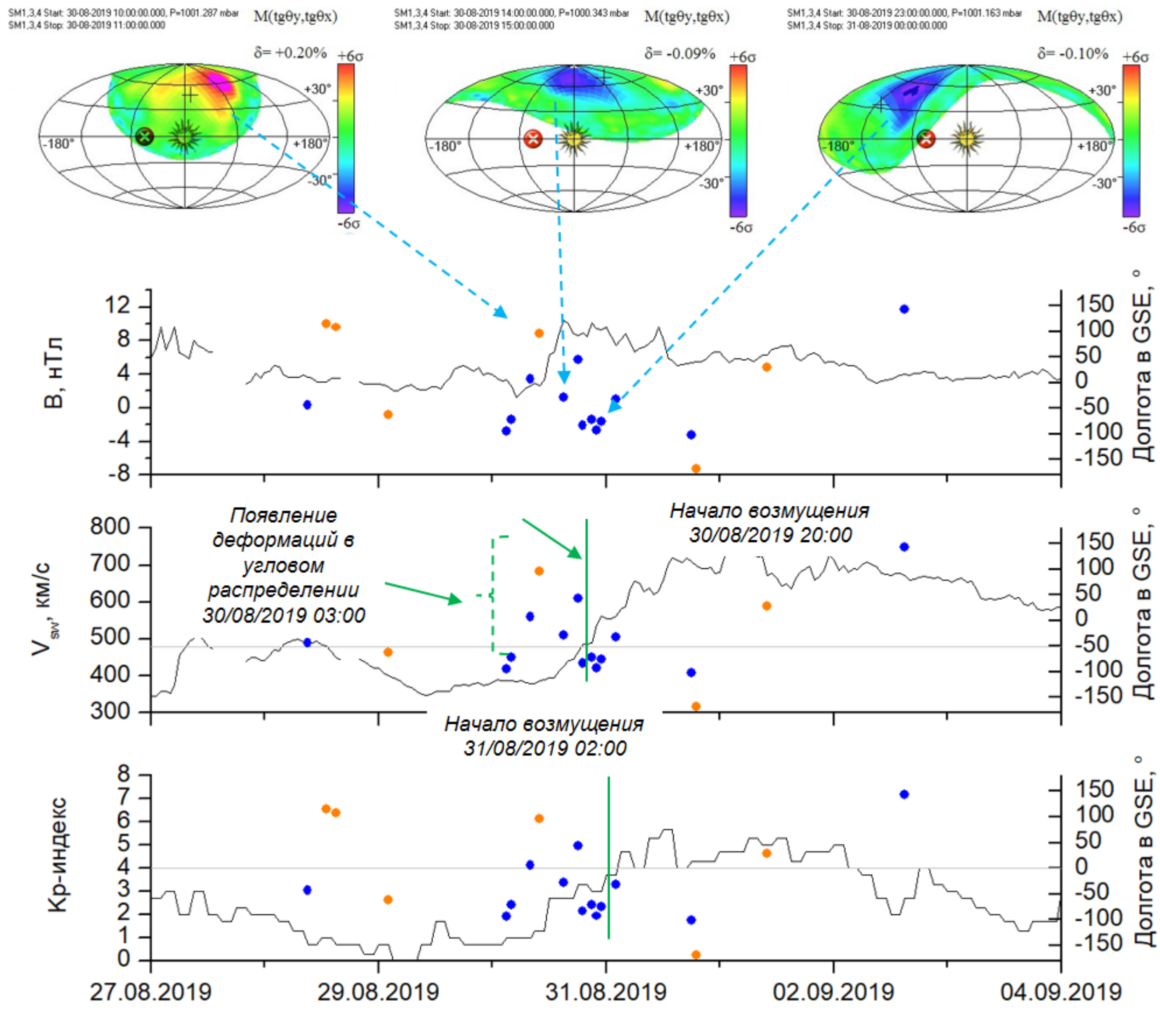


Рисунок 5.19. Сопоставление параметров межпланетной среды, индекса геомагнитной активности и появления крупных областей деформаций потока КЛ по данным МГ УРАГАН

На рисунке видно, что первая зарегистрированная область понижения потока КЛ соответствовала углу в 50°, а первая зарегистрированная область повышения потока КЛ соответствовала углу в 105°. Область с максимальным отклонением была зарегистрирована 30.08.2019 в 22:00 UTC. Отклонение составило -5.3σ и соответствовало углу в 73°. Первая область понижения потока была зарегистрирована за 23 часа до начала магнитной бури.

В результате анализа было выявлено, что в 81 случае (72 ± 4)% выделялась область повышенного потока мюонов. На рисунке 5.20 представлено распределение Δ*t* – промежутка времени между первым «пятном» и началом магнитной бури для всех проанализированных событий. Из рисунка следует, что в среднем первая область деформации была зарегистрирована раньше на (18 ± 4) часа, чем магнитная буря.

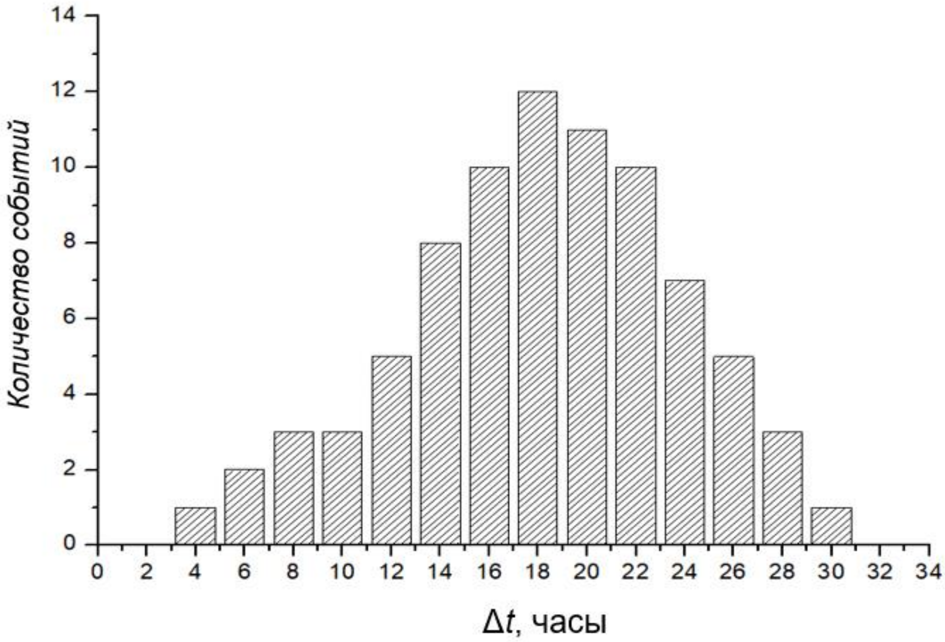


Рисунок 5.20. Распределение временных интервалов между регистрацией первой области деформации потока КЛ и началом магнитной бури на Земле [141]

5.4. Основные результаты и выводы главы 5

При анализе корональных выбросов масс и высокоскоростного солнечного ветра как основных гелиосферных источников возмущений в магнитосфере были получены следующие результаты:

– изучены геоэффективные и негеоэффективные корональные выбросы масс в период с 2007 по 2020 гг. Проведен анализ наиболее ярких событий, произошедших в 2012 и 2015 годах, с использованием данных о космической погоде, получаемых со спутниковых аппаратов, наземных геомагнитных станций и от сети нейтронных мониторов;

– разработан метод анализа динамики мюонографий в GSE-системе на основе выделения областей деформаций углового распределения потока космических лучей и построения соответствующих распределений областей деформаций углового распределения по долготам во времени;
– впервые получены GSE-отображения деформаций углового распределения на основе анализа последовательностей мюонографий для гелиосферных возмущений, вызванных корональными выбросами масс, выявлены особенности регистрации геоэффектиных и негеоэффектиных КВМ в различные периоды солнечной активности;
– установлено, что в периоды минимумов солнечной активности, пришедшиеся на 2008 – 2010 гг. и 2017 – 2019 гг., повышение потока космических лучей, вызванное высокоскоростным солнечным ветром, в (72 ± 4)% случаев наблюдалось в среднем за (18 ± 4) часов до начала магнитного возмущения на Земле.

ГЛАВА 6. МЮОНОГРАФИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Мюонография атмосферных процессов – новое направление в развитии глобальной системы наблюдения за окружающей средой, основанное на анализе вариаций проникающей компоненты космических лучей (КЛ). При одновременном детектировании потока мюонов со всех направлений в годоскопическом режиме можно получить общую картину активных процессов в верхних слоях тропосферы, а также проследить динамику их изменений, в частности, выявить области возмущений, определить направление и скорость их движения, а также оценить время их появления в данной точке. Метод чувствителен к крупномасштабным атмосферным процессам, а также к быстро меняющимся локальным явлениям. Он позволяет исследовать характеристики волновых процессов, порождаемых сильными турбулентными явлениями, в том числе потенциально опасными (штормы, шквалы, ураганы, торнадо и т. д.) [60,66, 151].

Атмосфера Земли – это открытая система, в которой основные процессы определяются активностью Солнца. Атмосфера облучается космическими лучами солнечного, галактического и внегалактического происхождения, которые являются одними из основных источников ионизации воздуха и генерации облаков. Изменения глобального климата и рост количества атмосферных явлений катастрофического характера стимулируют развитие новых систем раннего обнаружения опасных метеорологических явлений.

Наряду с интегральной модуляцией потока мюонов на поверхности Земли – барометрическим и температурным эффектами – существуют более сложные механизмы модуляции, связанные с распространением различных волн в верхних слоях атмосферы, которые генерируются при образовании ячеек турбулентности – будущих ураганов и торнадо.

Физические основы мюонографии атмосферы базируются на тесной связи различных атмосферных явлений с процессами генерации и распространения мюонов в атмосфере [59, 152]. Получение подобной, принципиально новой, информации о состоянии атмосферы одновременно над большой территорией в сочетании с данными других метеорологических комплексов, например доплеровских метеорологических радиолокаторов, существенно расширяет возможности наземного мониторинга различных атмосферных возмущений потенциально опасного характера.

Метод мюонографии основывается на сравнении и корреляционном анализе характеристик вариаций потока мюонов на поверхности Земли с различными крупномасштабными и локальными метеорологическими процессами в районе расположения мюонного годоскопа. При этом используется история погоды, которая формируется на основе данных, получаемых из нескольких независимых источников информации, доступной на различных интернет-сайтах, и результатов обработки синоптических карт и спутниковых изображений.

С помощью метода мюонографии были проведены исследования крупномасштабных барических образований, атмосферных фронтов и грозовых явлений (ГЯ), проходящих над Московским регионом. Для анализа атмосферных процессов использовались 5-минутные данные как интегрального темпа счета мюонного годоскопа УРАГАН, так и временных рядов параметров локальной анизотропии потока мюонов.

6.1. Исследование крупномасштабных барических образований, проходящих над Москвой

6.1.1. Циклоны и антициклоны

Крупные барические образования, такие как циклоны и антициклоны, являются удобными атмосферными явлениями для изучения возможностей мюонографий по мониторингу атмосферы над Московским регионом. Для поиска закономерностей, связывающих угловые вариации потока мюонов с параметрами движения циклонов и антициклонов, использовались временные ряды проекций вектора анизотропии A_S и A_E.

С приходом большого барического образования поток мюонов изменяется, а, следовательно, изменяется и вектор анизотропии: с приходом антициклона длина вектора локальной анизотропии уменьшается, а с приходом циклона – увеличивается. Однако при рассмотрении проекций необходимо учитывать направление прихода потока мюонов. На рисунке 6.1 показаны проекции A_S и A_E для антициклона и циклона, пришедших с одного направления (с запада) [153]. Поведение средних значений проекций показано сплошными непрерывными линиями.

На рисунке видно, что при приближении антициклона значение проекции вектора анизотропии в восточном направлении A_E уменьшается из-за того, что увеличивается поток мюонов с западного направления, следовательно, вектор анизотропии отклоняется в противоположном направлении. При приближении циклона происходит обратный процесс. При этом проекция на южное направление A_S не меняется (видна только суточная вариация), так как в этом направлении поток мюонов не меняется.

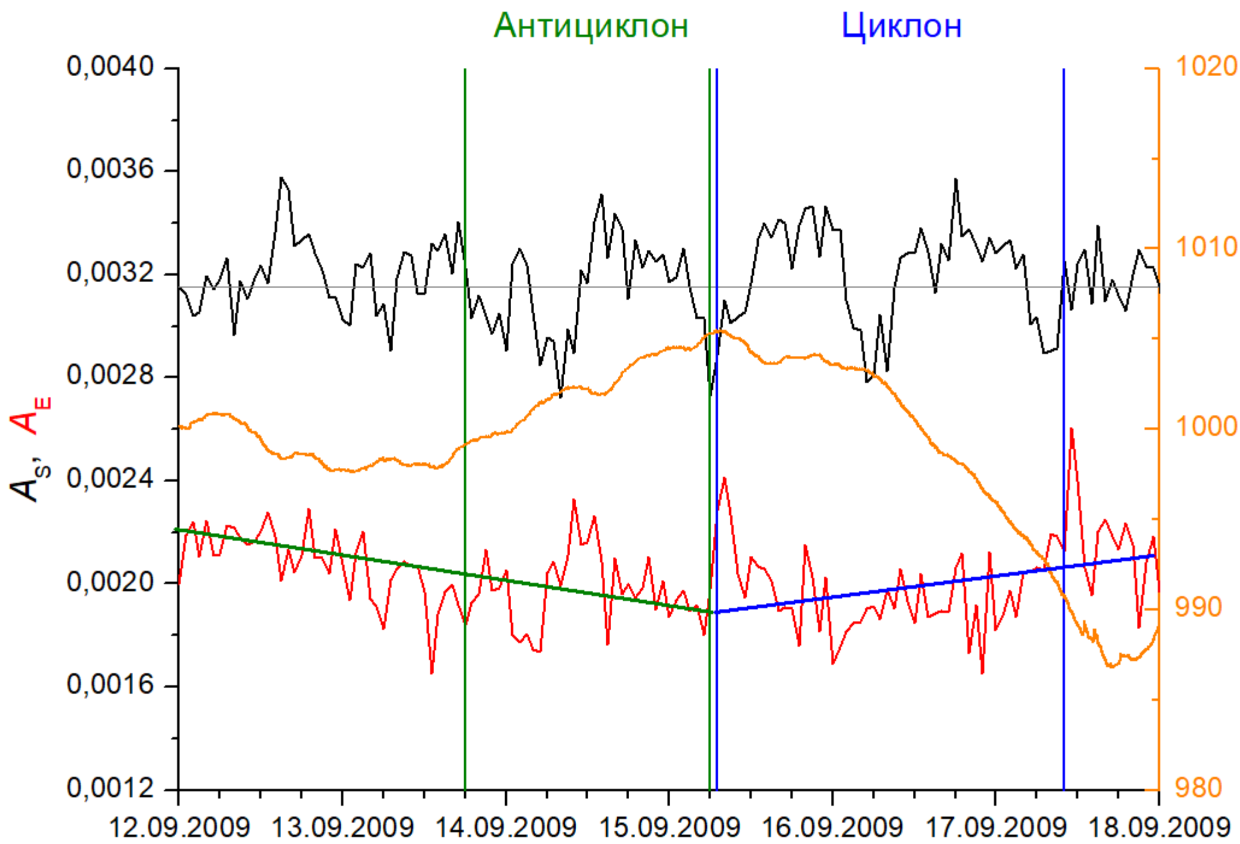


Рисунок 6.1. Вариации проекций вектора локальной анизотропии A_S и A_E при прохождении антициклона и циклона. Сплошные непрерывные линии показывают поведение наблюдаемых средних значений A_S (черная линия), A_E (красная линия), а также атмосферное давление (оранжевая линия)

На рисунке 6.2 показано сравнение периодов прохождения крупномасштабных атмосферных процессов над местом расположения годоскопа УРАГАН с вариациями потока мюонов, зарегистрированных в июле 2009 года [153]. Этот год был выбран для исследования из-за его низкой солнечной активности, соответствующей минимуму солнечного цикла. На основе анализа синоптических карт выбраны периоды прохождения барических образований (циклонов и антициклонов) над Московским регионом.

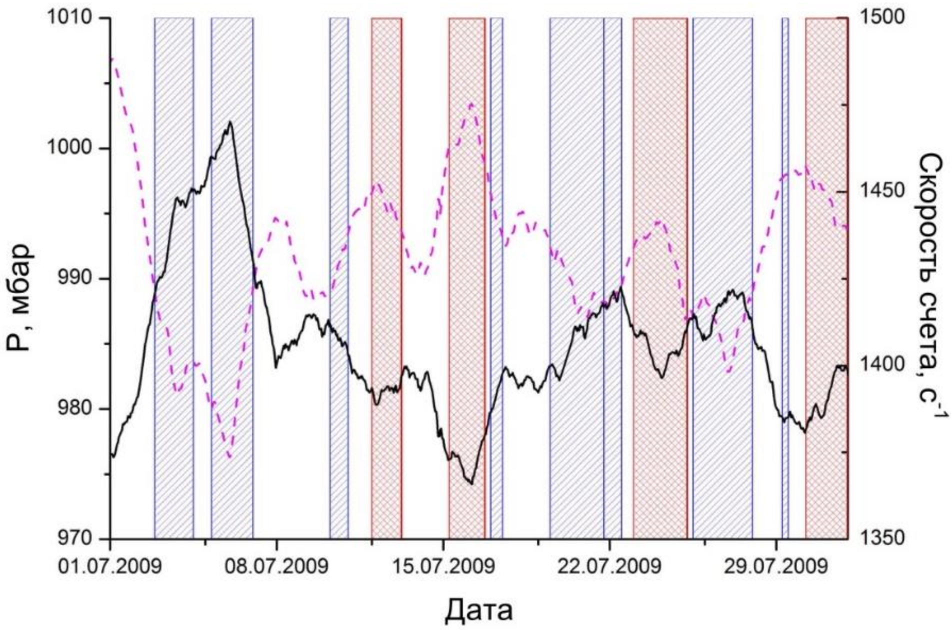


Рисунок 6.2. Вариации потока мюонов (черная линия) и атмосферного давления (красная пунктирная линия) во время прохождения барических образований, июль 2009 года. Синие области: периоды прохождения циклонов. Красные области: периоды прохождения антициклонов.

На рисунке 6.2 синие области, заштрихованные линией, соответствуют периодам циклонов, красные области, заштрихованные крест-накрест, – антициклонам. Приведены также ряды давления и скорости счета мюонов. На графиках видно, что с приходом циклона скорость счета мюонов увеличивается из-за снижения давления. При уходе циклона давление начинает расти, а скорость счета мюонов падает. Во время прохождения антициклона происходит обратный процесс: сначала скорость счета падает из-за повышения давления, затем, когда антициклон уходит, давление падает, а скорость регистрации мюонов увеличивается.

6.1.2. Атмосферные фронты

Атмосферные фронты представляют собой прилегающие воздушные массы, разделенные относительно узкими переходными зонами, сильно наклоненными к поверхности Земли. На холодных фронтах воздушные массы текут клином под теплый воздух, заставляя его двигаться вверх по разделяющей поверхности. В этом случае холодный воздух испытывает трение о поверхность Земли, а его нижние слои оказываются позади верхних, что приводит к закручиванию передней поверхности. Когда наступает теплый фронт, он движется над клином холодного фронта и идет вверх по этому клину, адиабатически охлаждаясь при этом движении.

На основе данных, полученных с помощью мюонного годоскопа УРАГАН, исследованы корреляции параметров интегрального потока мюонов и анизотропии углового распределения потока мюонов при прохождении фронтов над Московским регионом в период с 2010 по 2011 гг. [153]. Список атмосферных фронтов сформирован на основе анализа синоптических карт. На рисунках 6.3, 6.4 представлены корреляции между атмосферным давлением и характеристиками регистрируемых изменений потока мюонов при прохождении холодных и теплых фронтов.

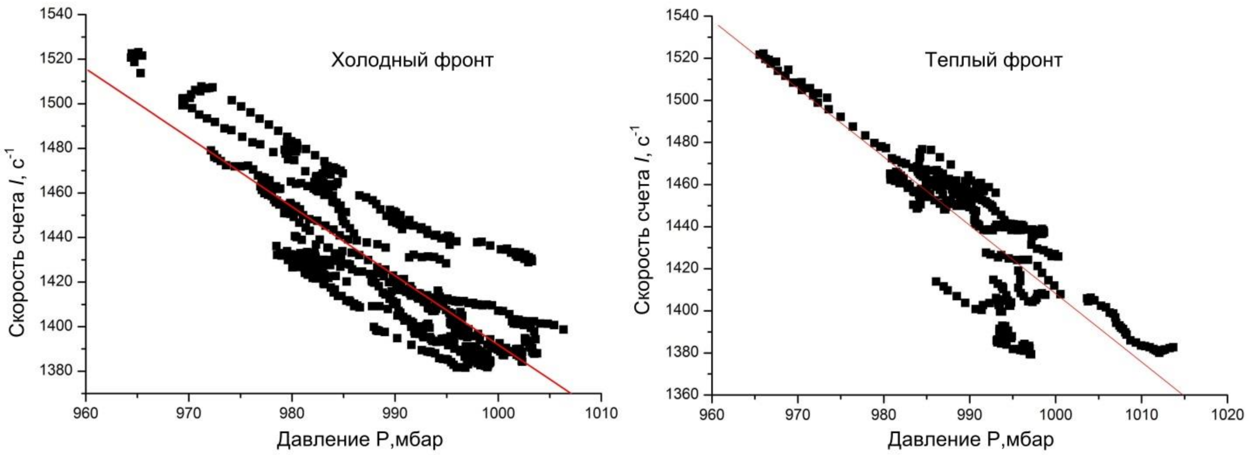


Рисунок 6.3. Зависимость интегральной скорости счета МГ УРАГАН от атмосферного давления при прохождении фронтов над Московской областью. Слева: холодный фронт; справа: теплый фронт

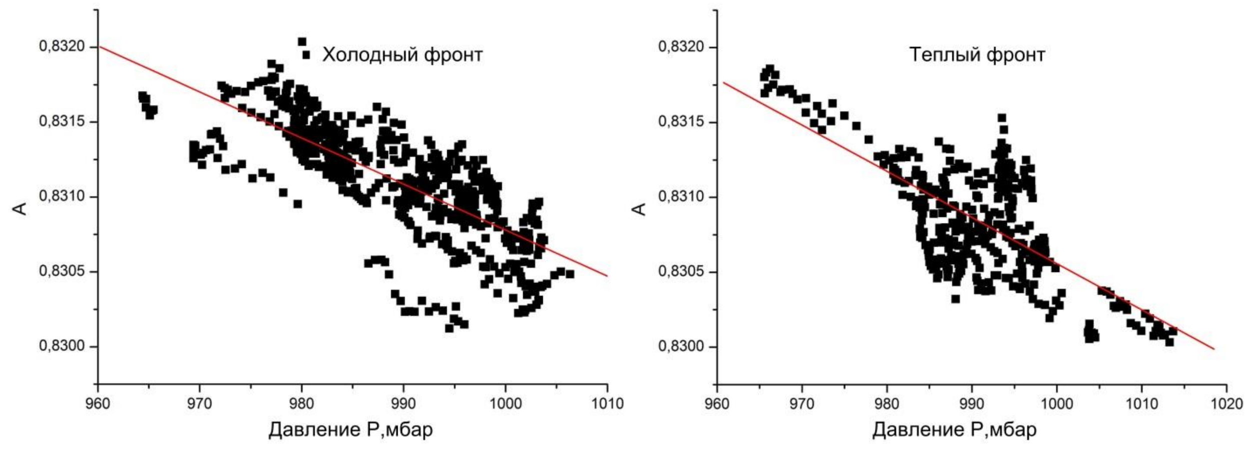


Рисунок 6.4. Зависимость длины вектора анизотропии потока мюонов, обнаруженного МГ УРАГАН, от атмосферного давления при прохождении фронтов над Московской областью. Слева: холодный фронт; справа: теплый фронт

Анализ распределений показал, что скорость счета мюонов хорошо антикоррелирует с давлением в случае холодного и теплого фронтов. Величина же вектора анизотропии *A* антикоррелирует с давлением.

6.2. Исследование грозовых явлений над Московским регионом

Изучение быстро меняющихся нестационарных процессов местного происхождения в атмосфере, в частности мощных гроз, является очень важной задачей мюонной диагностики.

Первые исследования изменений интенсивности потока мюонов были проведены на основе анализа данных летнего периода 2009 года (выбор года обусловлен минимумом солнечной активности). В этот период в Москве было зарегистрировано 20 грозовых возмущений, для 12 самых мощных из них (мощность оценивалась по высоте «грозового носа» $\Delta P_{н}$) были обработаны и проанализированы данные, полученные на МГ УРАГАН.

Проведенный анализ данных, полученных при наблюдении за этими грозами, продемонстрировал многообещающие перспективы использования мюонов космических лучей в качестве инструмента для мониторинга и прогноза атмосферных явлений [154]. Были изучены ряды мюонографий во время 12 грозовых событий и было показано, что для большинства гроз наблюдается отклик потока мюонов как в общем темпе счета, так и в зенитно-азимутальном распределении интенсивности. Было продемонстрировано, что метод мюонографии позволяет регистрировать изменения локальной анизотропии потока мюонов, анализ которых свидетельствует о чувствительности проникающей компоненты космических лучей к турбулентным возмущениям в атмосфере во время гроз.

Данные мюонного годоскопа УРАГАН сопоставлялись с данными фактической погоды. Для этого была разработана специальная процедура наблюдения погодной истории. С ее помощью фиксировалась информация о различных метеорологических явлениях в районе расположения мюонного годоскопа. Для получения полной картины о грозовой активности в период с мая по сентябрь 2009 года использовалось несколько источников данных, каждый из которых являлся источником проверки других. Такими источниками стали:

1) показания температурного и барометрического датчиков установки УРАГАН;
2) информация с московской метеостанции, расположенной в районе ВВЦ [155];

3) данные датчика молний, который регистрирует интенсивность вспышек молний над Европой, в том числе и над европейской частью России [156];
4) визуальные наблюдения грозовых процессов в районе расположения установки (ЮАО, г. Москвы).

Несмотря на многоплановость собранной информации, основным критерием отбора грозового события было наличие «грозового носа» (рисунок 6.5) – характерного пика атмосферного давления, сопровождающего прохождение грозового облака через точку наблюдения. Амплитуда такого всплеска может находиться в диапазоне от 0.5 до 5 мбар и зависит от характера процесса. Грозовое облако может двигаться на разных расстояниях от датчика давления, с различной скоростью и проходить на разных высотах [154, 157, 159].

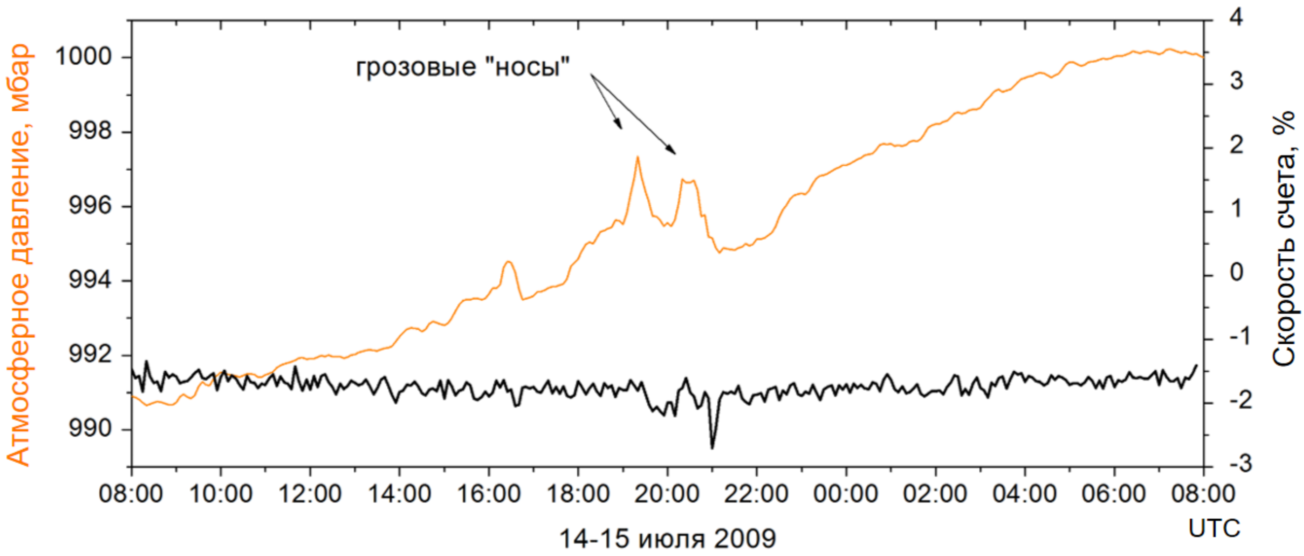


Рисунок 6.5. Пример резкого роста давления («грозовой нос») в момент прихода грозы и уменьшения скорости счета мюонного годоскопа УРАГАН (за ноль принято среднегодовое значение) [157]

Для исследования корреляций между изменениями потока мюонов и атмосферными возмущениями применялись мюонографии атмосферы. Для анализа гроз использовались данные об отклонениях пятиминутных значений от среднего за предшествующие сутки с учетом барометрического эффекта, который позволяет убрать тренд, связанный с изменением давления, и выделить аномальный барометрический эффект, коэффициент которого значительно отличается от усредненного коэффициента.

Изменения потока мюонов в определенном направлении небесной сферы отражают соответствующие ячейки угловой матрицы. Для того чтобы мюонный снимок наложить на карту местности, из точки расположения детектора в направлениях, соответствующих ячейкам угловых матриц, проводятся прямые и определяются точки пересечения этих прямых с эффективным уровнем генерации мюонов (высота ~ 15 км). Затем из точек пересечения на поверхность Земли опускаются перпендикуляры. В результате положение угловой ячейки на карте является проекцией места, над которым происходит генерация мюонов для данного направления. Примеры мюонографий для гроз, прошедших 12 мая и 14 июля 2009 года, приведены на рисунке 6.6. Статистическая обеспеченность такой матрицы около 1 млн. событий. На рисунках видно, что во время грозовых возмущений неоднородность потока мюонов проявляется достаточно хорошо и с некоторых направлений понижение потока превышает 4σ.

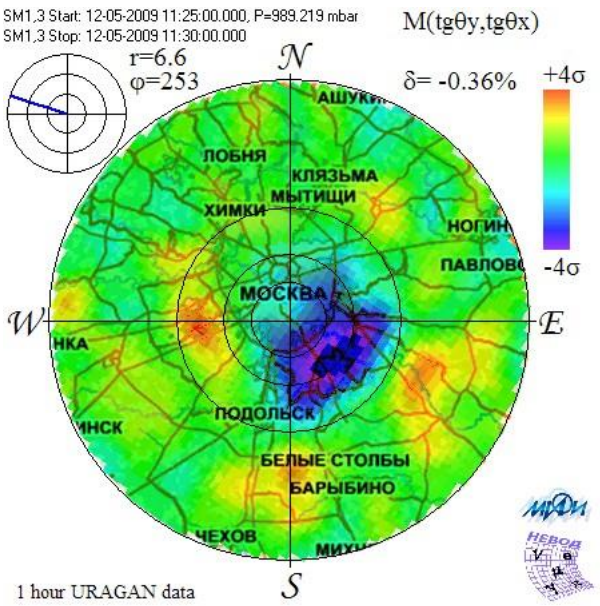


Рисунок 6.6. Пример сглаженной пятиминутной матрицы изменений углового распределения потока регистрируемых частиц с учетом статистических ошибок во время грозовых явлений 12 и 14 июля 2009 года

Развитие грозовых ячеек сопровождается мощными турбулентными и конвективными процессами, которые вызывают различные волновые процессы в верхней тропосфере. Примеры графиков различных параметров, рассчитанных на основе матричных данных, представлены на рисунке 6.7: слева – мюонографии для грозы, прошедшей 19 июня 2011 года, полученные в период с 20:35 UTC до 21:05 UTC с пятиминутным шагом и совмещенные с картой Московской области [158]; справа –

поведение атмосферного давления, относительное изменение интегральной скорости, модуль вектора локальной анизотропии и его горизонтальная проекция.

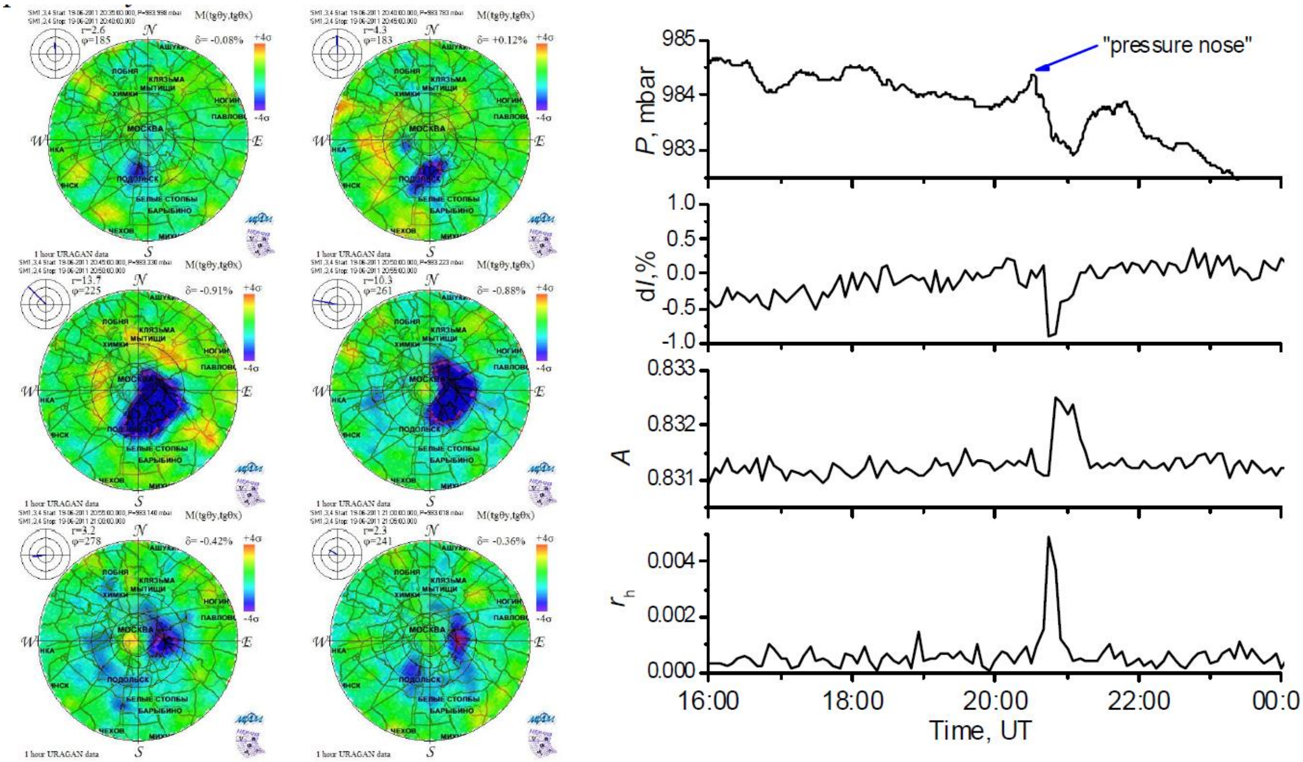


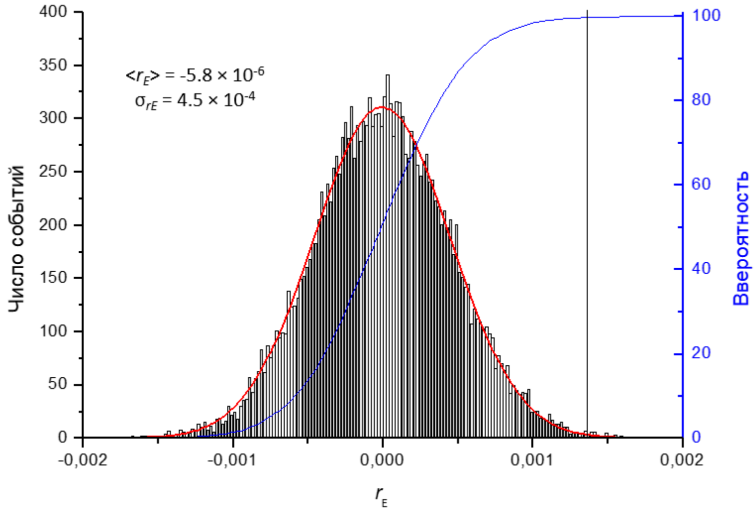
Рисунок 6.7. Последовательность мюонографий характеристики анизотропии потока мюонов во время грозы в Москве 19 июня 2011 года

В период с 2008 по 2011 гг. около точки нахождения УРАГАНА было зафиксировано 67 гроз. Анализ отклика мюонного годоскопа показал, что более 70% событий имеют четкую реакцию интегральной скорости счета. А реакция разных характеристик анизотропии потока мюонов проявлялась практически во всех грозах.

Мюонографии атмосферы показывают изменения в угловом распределении интенсивности потока мюонов, вызванные грозовыми возмущениями, и, как правило, отражают распределение неоднородности плотности воздуха в районе грозового облака.

Для количественного анализа мюонографий грозовых явлений использовались пятиминутные экспериментальные данные: интегральная скорость счета (с коррекцией и без коррекции на барометрический эффект), параметры локальной анизотропии потока мюонов, которые характеризуют угловое распределение этого потока (вектор относительной анизотропии r, его проекции на географический юг и восток – r_S и r_E, а также горизонтальная проекция r_h, и скорость ее изменения за 5 минут – Δr_h) [81]. Для всех параметров потока мюонов были рассчитаны их дифференциальные и интегральные распределения для пятиминутных данных. В качестве примера на рисунке

6.8 представлены распределения для проекции вектора относительной анизотропии на географический восток r_E и величины r_h – горизонтальной проекции этого вектора.



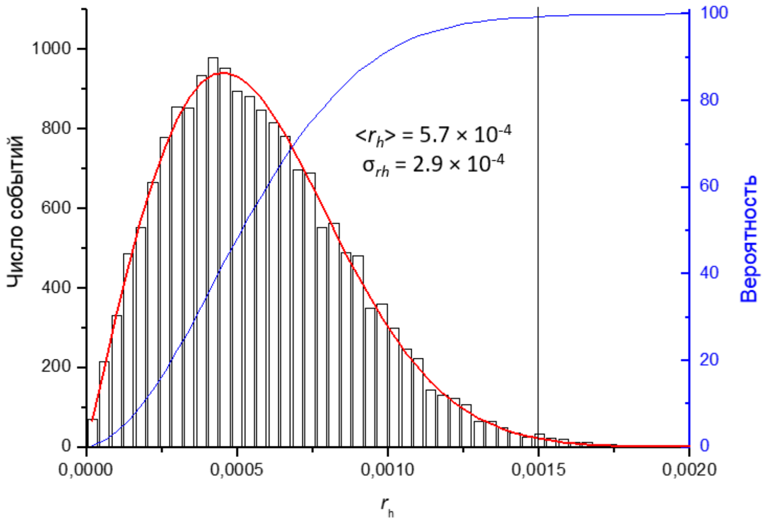


Рисунок 6.8. Интегральные и дифференциальные распределения для проекции вектора относительной анизотропии на географический восток r_E и величины r_h – горизонтальной проекции этого вектора

Как видно из рассчитанных интегральных распределений параметров вектора относительной анизотропии потока мюонов, при значениях 3σ вероятность случайного выброса составляет менее 1%.

Для исследования географического смещения параметров вектора относительной анизотропии потока мюонов во время грозового явления (ГЯ), а также для количественного описания мюонографий и изучения закономерностей в анизотропии потока мюонов во время ГЯ по азимутальным направлениям удобно использовать корреляции проекций вектора относительной анизотропии потока мюонов на юг и на восток (r_S и r_E соответственно). На рисунке 6.9 представлены корреляционные зависимости этих величин в 2014 – 2015 гг. и пример изменения поведения анизотропии потока мюонов во время грозы, прошедшей 8 августа 2014 года, по азимутальным направлениям.

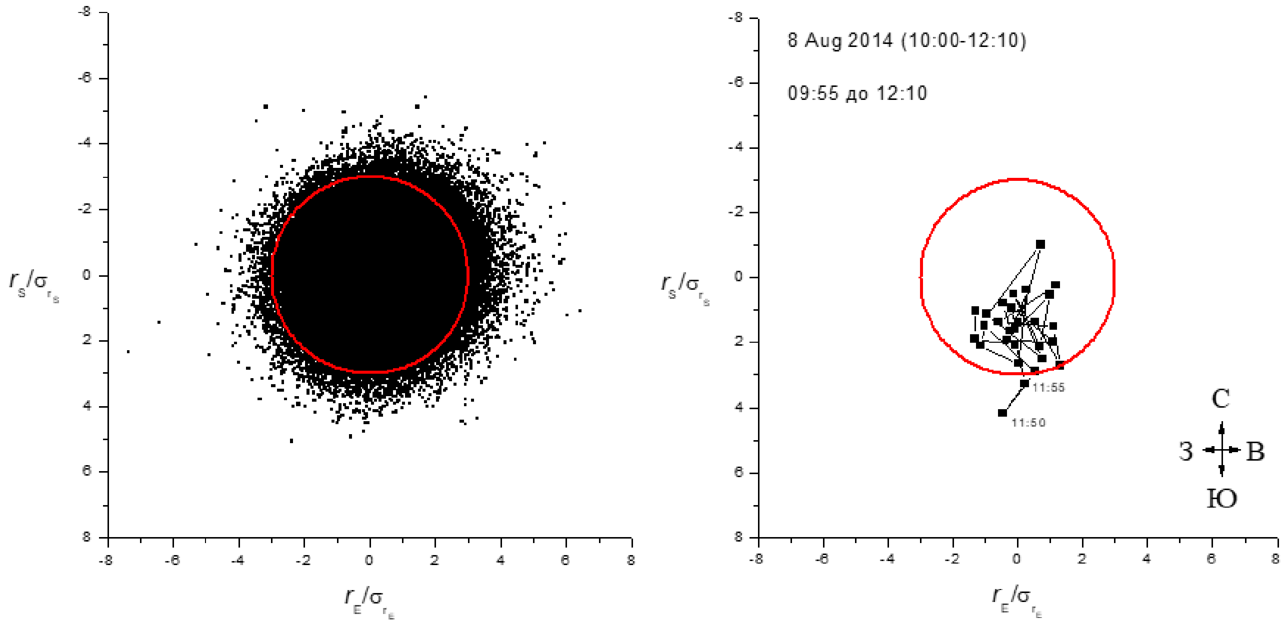


Рисунок 6.9. Корреляционные зависимости проекций вектора относительной анизотропии потока мюонов на юг и на восток за период с 2014 по 2015 гг. (слева) и изменение этих величин для грозы, прошедшей 8 августа 2014 года (справа)

На рисунке 6.9 красным кругом выделена область значений 3σ в распределении проекций вектора относительной анизотропии потока мюонов на юг и на восток за период с 2014 по 2015 гг.. Выход величин r_S и r_E за пределы красного круга соответствует возмущениям в потоке мюонов, выходящим за пределы нормальных флуктуаций.

6.3.Сопоставление данных МГ УРАГАН с данными доплеровского метеорадара

Важным этапом в развитии метода мюонографии атмосферы явилось использование данных метеорологических доплеровских радаров, развернутых в Московском регионе. Пространственные и угловые параметры потока мюонов, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН во время гроз в Московском регионе, прошедших в 2014 – 2016 гг., анализировались в сопоставлении с данными доплеровского метеорадара DMRL-C [159, 160].

Принцип работы радиолокаторов заключается в расчете отражаемости радиолуча от различных гидрометеоров (капель, снежинок и т.п.). По времени прихода и интенсивности возвратного излучения рассчитываются различные метеопараметры, которые впоследствии используются в синоптической практике. Инструментальная дальность радиолуча DMRL-C составляет 250 км, максимальная высота обнаружения – 20 км. Диапазон зенитных углов составляет от ~0.1° до 86°. Рабочий диапазон частот DMRL-C – от 5.6 до 5.65 ГГц. Локатор осуществляет циклические наблюдения с периодичностью в 10 минут в круглосуточном автоматизированном режиме, предоставляя данные с высоким пространственным разрешением (0.5 – 1 км) на площади до 200 тыс. кв. км. На рисунке 6.10 приведены данные радиолокатора, которые представляют собой трехмерные карты радиолокационного обзора (карты явлений). Разрешение карт составляет 1 х 1 км. В работе использовались данные, полученные DMRL-C, расположенными в аэропортах Внуково и Шереметьево.

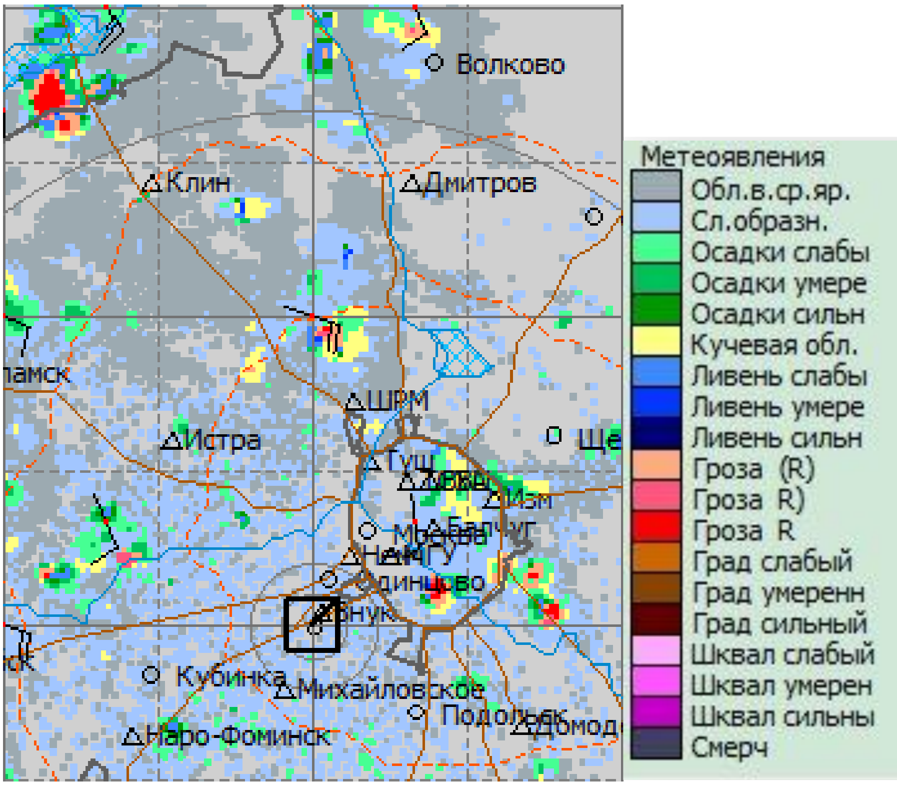


Рисунок.6.10. Пример трехмерной карты радиолокационного обзора

Такие карты позволяют определять тип атмосферных явлений, вид облачности, скорость и направление движения метеообразований, границы облаков и осадков, турбулентные и конвективные образования атмосферы и другие параметры.

Для визуального сопоставления доплеровских карт с мюонографиями изображения были центрированы по МКАД и, соответственно, масштабированы по размеру. На рисунке 6.11 представлен пример сравнения доплеровской карты с мюонографией.

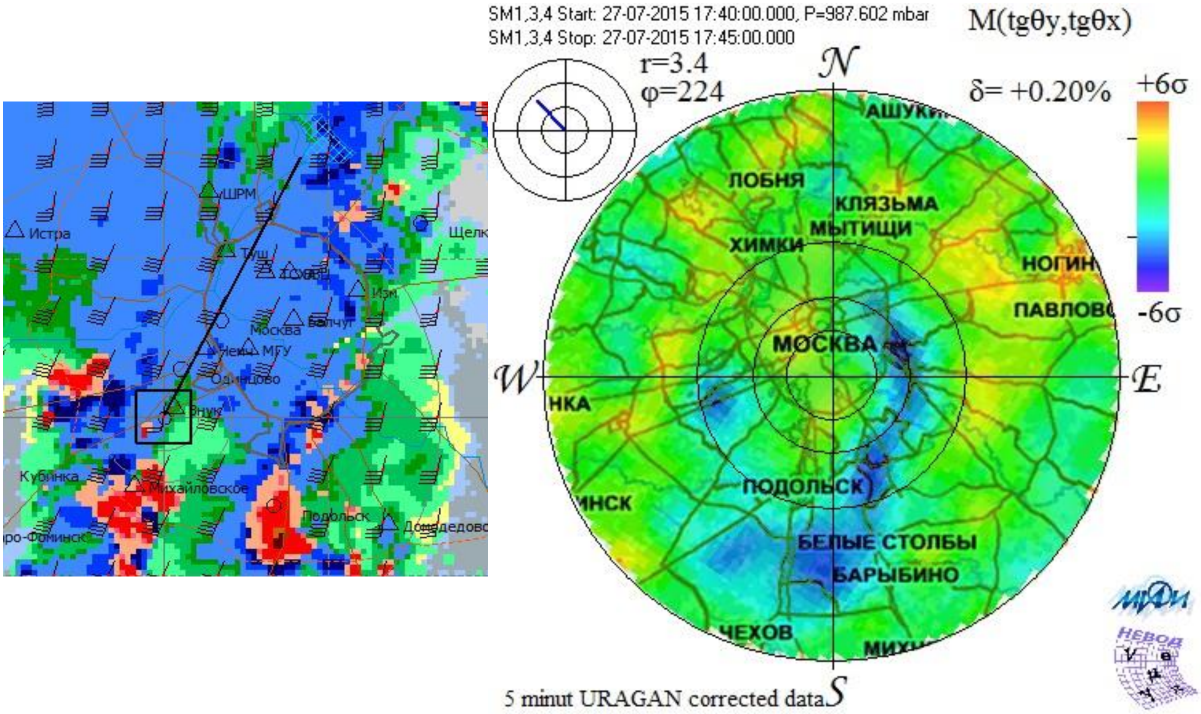


Рисунок 6.11. Пример сопоставления доплеровской карты с мюонографией во время протекания грозы 27 мая 2015 года

На рисунке 6.11 видно, что грозе, которая была зарегистрирована доплеровским радаром и двигалась со стороны г. Подольска к югу и юго-западу г. Москвы (красный цвет), соответствует минимум (синий цвет) потока мюонов, зарегистрированного в это же время мюонным годоскопом УРАГАН.

Анализ данных, полученных доплеровским метеорадаром DMRL-C и из дополнительных метеорологических источников, за период с 2014 по 2016 гг. позволил выделить 97 грозовых явлений, зарегистрированных в Московском регионе. Учет периодов с вариациями, вызванными возмущениями, которые связаны с солнечной активностью, и возмущениями в межпланетных и земных магнитных полях, позволил сократить количество гроз, отобранных для дальнейшего физического анализа, до 64. Эти события были классифицированы в соответствии с их метеорологическими параметрами:

- атмосферными фронтами (теплым, холодным, окклюдированным, смешанным и без фронта);
- типами грозовых ячеек (одноячейковыми, многоячейковыми, взрывной конвекцией);

– интенсивностью осадков;
– скоростями движения воздушных масс;
– высотами тропопаузы и верхней границы облачности.

При анализе каждого грозового события визуально сравнивались карты радиолокационных наблюдений с мюонографиями, а также оценивалось поведение характеристик потока мюонов и различных метеорологических параметров. Таким образом, анализ грозовых явлений, по данным УРАГАН и DMRL-C, включал несколько основных этапов:

– анализ ситуации в гелиосфере и магнитосфере;
– изучение метеорологической обстановки;
– визуальное сравнение метеокарт и мюонографий;
– исследование интегральных характеристик потока мюонов;
– исследование временных характеристик относительной анизотропии потока мюонов;
– исследование азимутальных распределений потока мюонов, в том числе по географическим направлениям.

На примере грозового явления, зарегистрированного 29 мая 2015 года, описана методика анализа данных, полученных DMRL-C и МГ УРАГАН. На рисунке 6.12 представлены изменения скорости счета мюонного годоскопа УРАГАН и атмосферного давления, зафиксированные 29 мая 2015 года. В этот период наблюдалось несколько грозовых явлений, которые отмечены на графике вертикальными линиями.

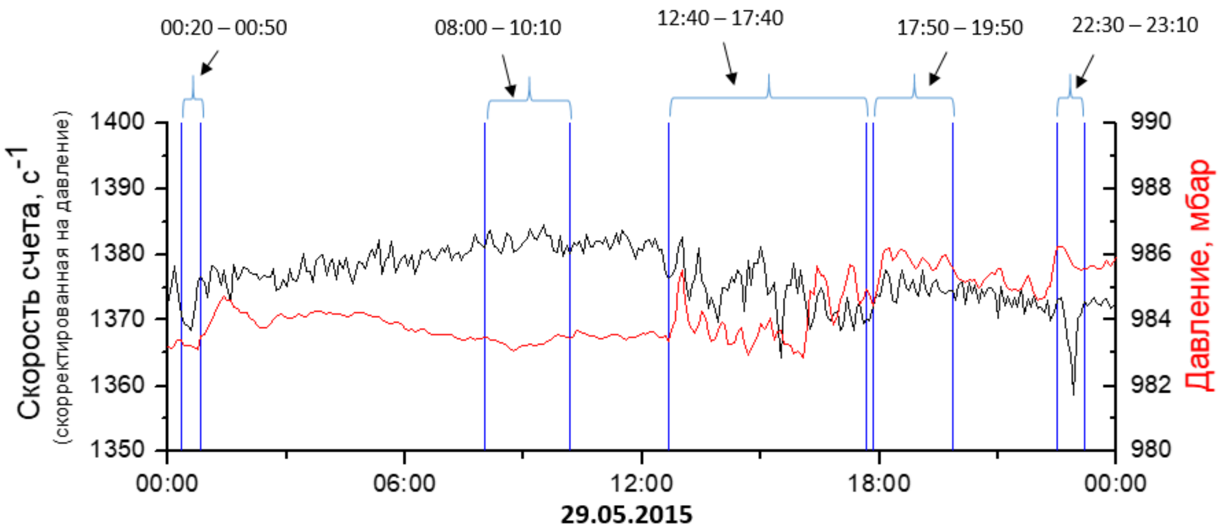


Рисунок 6.12. Временные изменения интегральной пятиминутной скорости счета МГ УРАГАН и давления, зарегистрированные в период с 29 по 30 мая 2015 года

На рисунке видны антикорреляции между давлением и скоростью счета. Наиболее яркое проявление наблюдается во время грозы, произошедшей в 22:30 UTC, когда был зафиксирован так называемый «грозовой нос». На рисунке 6.13 представлен темп изменения скорости счета (в %). Видно, что изменения превышают 3σ во время грозы в 12:40 UTC, а в 22:30 UTC во время появления «грозового носа» изменения превышают значение в 5σ.

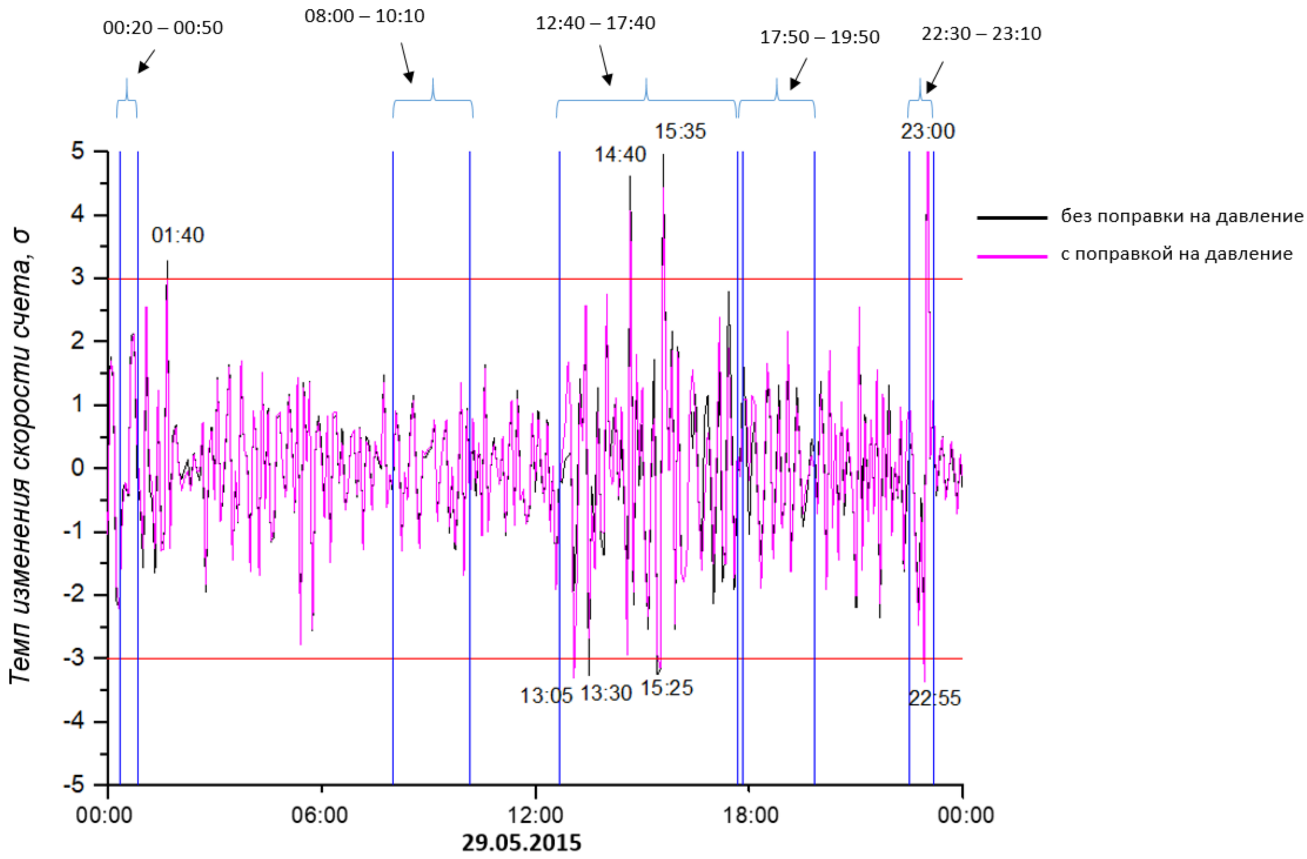


Рисунок 6.13. Временные изменения интегральной пяитминутной скорости счета МГ УРАГАН в период с 29 по 30 мая 2015 года. Вертикальные синие линии – периоды ГЯ. Красные горизонтальные линии – 3 σ

Для того чтобы исключить влияние гелиосферных событий на поток мюонов, было рассмотрено состояние гелиосферы и магнитосферы в период с 24 мая по 3 июня 2015 года. Соответствующие данные представлены на рисунке 6.14. Как видно на рисунке, в исследуемый период в гелиосфере и магнитосфере Земли не наблюдалось возмущений. Именно это позволило отобрать данный период с ГЯ для дальнейшего анализа.

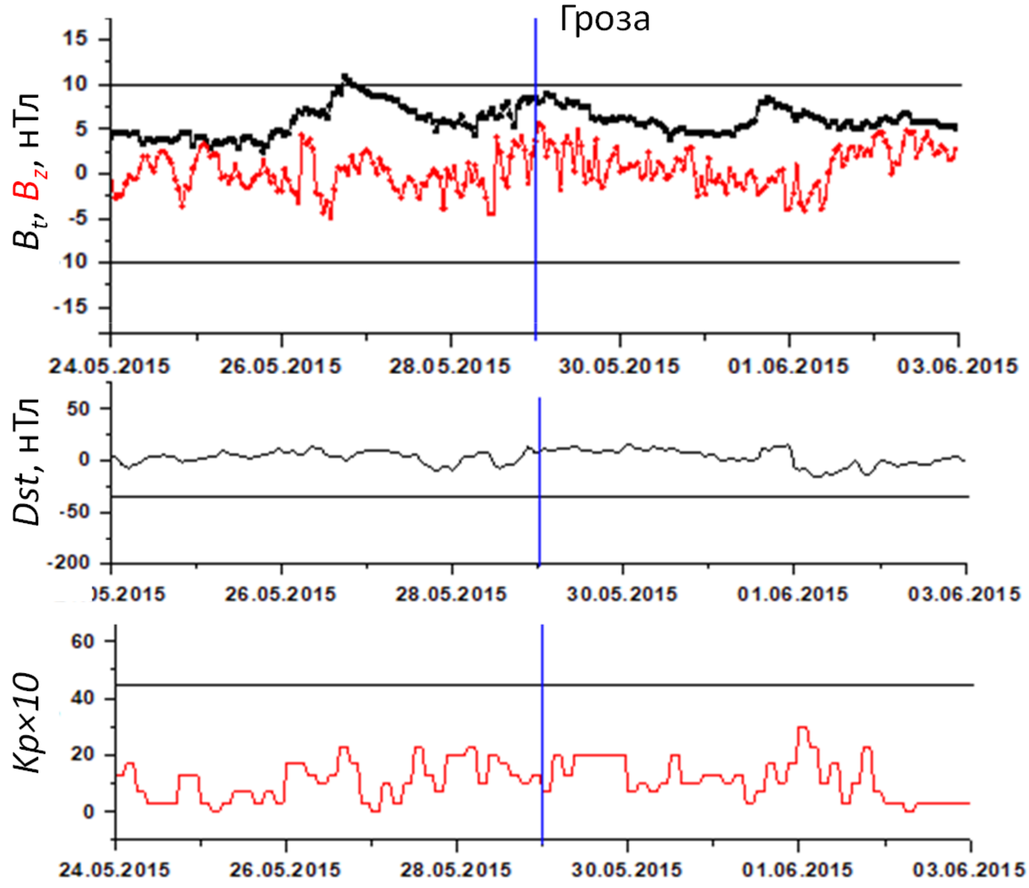


Рисунок 6.14. Изменения параметров межплатенного магнитного поля (слева), а именно: величин B_t (красная линия), B_z (черная линия) – и магнитного поля Земли (справа): Dst (сверху), Кр (снизу) в период с 24 мая по 3 июня 2015 года. Вертикальными линиями отмечено время грозы, зарегистрированной 29 мая 2015 года (22:30 UTC – 23:10 UTC)

На рисунке 6.15 представлены временные вариации горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов и скорости ее изменения во время исследуемого периода. На рисунке отмечено время, когда возникает максимальное значение параметров для каждой грозы. Показано, что практически во все периоды, соответствующие грозам, наблюдаются изменения в параметрах анизотропии потока мюонов. Выход этих параметров за статистические погрешности фиксировался и соотносился с параметрами ГЯ. Видно, что максимальные изменения параметров r_h и Δr_h наблюдались в исследуемый период с 22:30 UTC до 23:10 UTC.

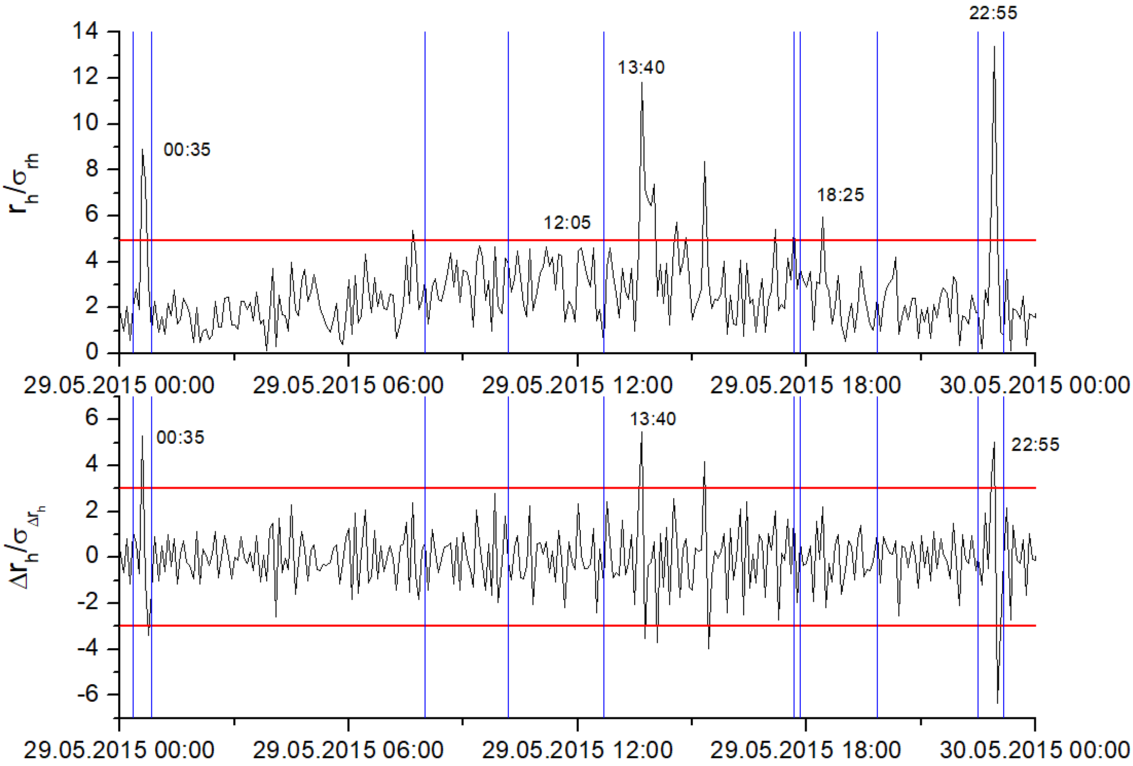


Рисунок 6.15. Временные изменения параметров r_h и Δr_h в период с 29 по 30 мая 2015 года

Более подробно остановимся на анализе грозы, произошедшей в 22:30 UTC. На рисунке 6.16 показаны карты наблюдений, выполненных с помощью доплеровских погодных радаров DMRL-C, и мюонографии события, произошедшего 29 мая 2015 года в интервале с 22:30 UTC до 23:10 UTC. Данная гроза была классифицирована как одноячейковая на фоне теплого атмосферного фронта. Карты представлены для трех моментов: приближение грозы к точке локации годоскопа (22:30 UTC), прохождение грозы над годоскопом (22:50 UTC) и уход грозы (23:00 UTC). Области, соответствующие грозе (слева), и области дефицита потока мюонов (справа) на картах выделены красным и синим цветами соответственно. На рисунке видно, что, когда гроза приближалась и проходила над местом расположения мюонного годоскопа, наблюдалось предварительное уменьшение потока мюонов. Данное явление можно объяснить перемещением области высокого давления («грозового носа») перед грозой.

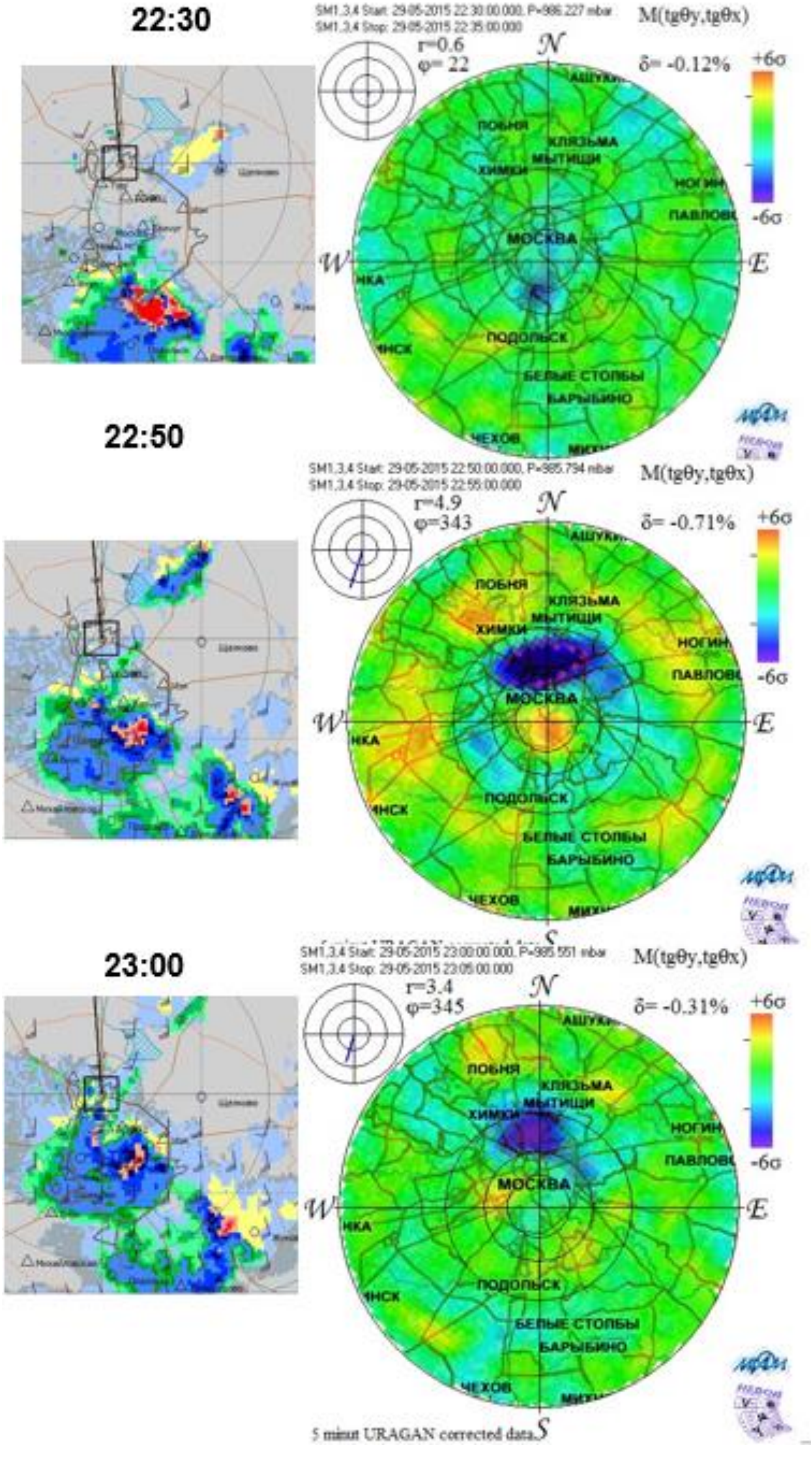


Рисунок 6.16. Сопоставление доплеровских метеокарт DMRL-C и мюонографий в период грозового события, произошедшего 29 мая 2015 года (22:30 UTC –23:10 UTC)

Для количественного описания мюонографий использовались корреляционные зависимости проекций вектора относительной анизотропии на географический юг и восток (r_S и r_E). На рисунке 6.17 представлена корреляционная зависимость параметров r_S и r_E, зафиксированных во время грозы, прошедшей 29 мая 2015 года в период с 22:30 UTC до 23:10 UTC.

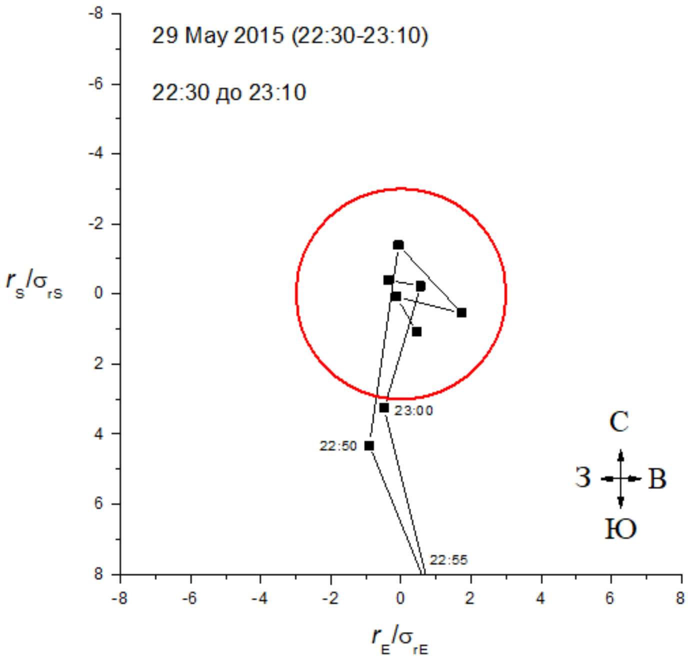


Рисунок 6.17. Корреляционная зависимость параметров r_S и r_E, зафиксированных во время грозы, прошедшей 29 мая 2015 года в период с 22:30 UTC до 23:10 UTC

Анализ корреляций показывает, что максимум интенсивности мюонов наблюдался на юге, следовательно, минимум – на севере, что антикоррелирует с азимутальным направлением движения воздушных масс, поскольку гроза двигалась с юга на север. Выход за пределы области 3σ (выделена красной окружностью на графике) наблюдается в момент начала грозы в 22:50 UTC, а максимум – в 22:55 UTC. Значения r_S и r_E, превышающие 3σ, указывают на направление максимума интенсивности мюонов в определенный момент времени. Соответственно, минимум был с противоположной стороны, там, где наблюдалось увеличение плотности атмосферы, связанное с образованием и развитием грозовой ячейки, в данном случае с облачными массами высокого влагосодержания.

6.4. Статистический анализ грозовых явлений

Разработанные подходы к анализу ГЯ с помощью метода мюонографии были применены при рассмотрении всех 64 грозовых событий. При их анализе особое внимание обращалось на то, как изменения характеристик потока мюонов при различных метеорологических параметрах грозовых явлений, влияли на оценку эффективности регистрации этих явлений мюонным годоскопом УРАГАН (таблица 6.1).

Таблица 6.1. Эффективность регистрации грозовых явлений МГ УРАГАН при различных типах фронтов

Параметры анизотропии	Тип грозы		Фронт					64 событий
	однояч.	многояч.	тепл.	хол.	окк.	смеш.	отсут.	
r_h	67 %	58 %	**83 %**	**82%**	44%	51%	34%	**69%**
r_S, r_E	64 %	71 %	**85 %**	**89%**	43%	49%	31%	**72%**

Показано, что более чувствительными к атмосферным возмущениям являются параметры анизотропии потока мюонов, которые в целом позволяют идентифицировать грозовые ячейки (ГЯ) с эффективностью около 70%, а при сопровождении ГЯ теплыми и холодными фронтами – более 80%.

Был проведен корреляционный анализ горизонтальной проекции вектора анизотропии потока мюонов и высоты топопаузы, а также верхних границ облачности (ВГО), определенных по данным доплеровского радара. Результаты анализа параметров r_h и высоты топопаузы представлены на рисунке 6.18.

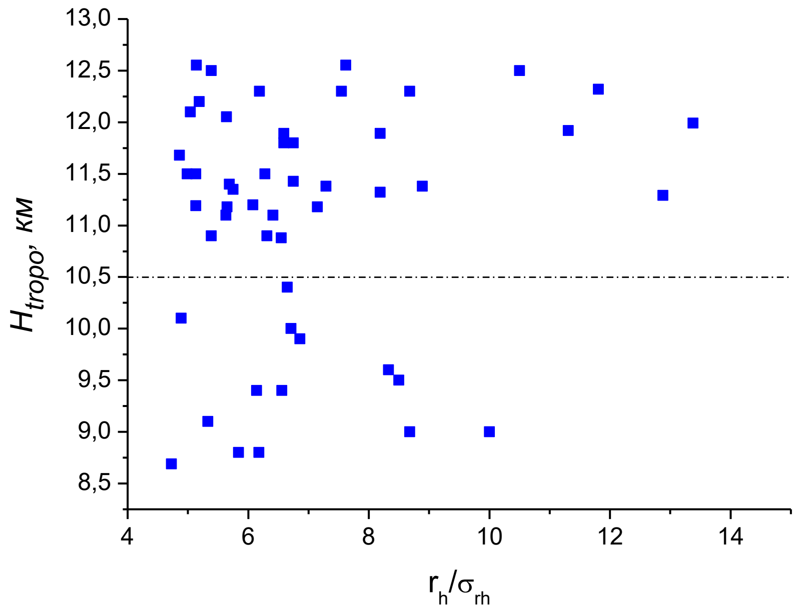


Рисунок 6.18. Корреляционные зависимости величины горизонтальной проекции вектора анизотропии потока мюонов от высоты тропопаузы

В таблицы 6.2 представлена эффективность регистрации грозовых явлений мюонным годоскопом УРАГАН при различных высотах тропопаузы и верхних границ облачности.

Таблица 6.2. Эффективность регистрации грозовых явлений МГ УРАГАН при различных высотах тропопаузы и верхних границ облачности

Параметры потока мюонов	Высота тропопаузы, км	Высота ВГО, км
	> 10.5	> 9,5
r_h	74%	76%
r_S, r_E	77%	79%

Результаты анализа зависимости r_h от высоты тропопаузы и ВГО показали, что в основном анизотропия потока мюонов наблюдается при H_{tropo}> 10.5 км и при $H_{ВГО}$> 9.5 км. Это хорошо согласуется с данными о высоте генерации мюонов в атмосфере (~ 15 км).

6.5. Основные результаты и выводы главы 6

1) Исследование крупномасштабных барических образований, проходивших над Москвой в основном с западного направления, показало, что при приближении антициклона проекция вектора анизотропии в восточном направлении A_E увеличивается из-за уменьшения потока мюонов с западного направления, следовательно, вектор анизотропии отклоняется в противоположном (восточном) направлении. При приближении циклона происходит обратный процесс. При этом проекция на южное направление A_S остается неизменной (видна только суточная вариация), так как в этом направлении поток мюонов не меняется.
2) Исследование атмосферных фронтов, проходящих над Московским регионом, показало, что скорость счета мюонов и величина вектора анизотропии A антикоррелирует с давлением в случае холодного и теплого фронтов, причем для теплых фронтов наблюдается менее определенная зависимость.
3) Исследование грозовых явлений с помощью мюонографий и их сопоставление с картами радиолокационного обзора показало:
   - характеристики потока мюонов обеспечивают хорошую и стабильную реакцию на прохождение грозы в непосредственной близости от мюонного детектора;

– более чувствительными к атмосферным возмущениям являются параметры анизотропии потока мюонов, которые в целом позволяют идентифицировать ГЯ с эффективностью около 70%, а при сопровождении ГЯ теплым и холодным фронтами – с эффективностью более 80%;
– наиболее информативными параметрами являются такие параметры, как корреляционная зависимость проекций вектора относительной анизотропии потока на направления север-юг и восток-запад от азимутального распределение направления вектора относительной анизотропии;
– в основном анизотропия потока мюонов наблюдается при высотах тропопаузы, составляющих больше 10.5 км, и высотах верхней границы облачности более 9.5 км, что хорошо согласуется с данными о высоте генерации мюонов в атмосфере (~15 км).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Метод мюонографии

1.1 Разработан способ получения мюонографий по данным мюонных годоскопов для изучения возмущений, вызванных солнечной активностью, в космическом и околоземном пространстве и для прослеживания динамики их развития [65, 66, 74].

1.2. Предложены количественные параметры, описывающие мюонографии: вектор локальной анизотропии потока мюонов космических лучей и его проекции, вектор относительной анизотропии, его горизонтальная проекция r_h и проекции на географический юг r_S и восток r_E, указывающие на анизотропию потока мюонов по азимутальным направлениям [81, 123, 133, 140].

1.3. Разработан метод перехода от мюонографий в аппаратурной системе координат к мюонографиям в системе GSE (Geocentric Solar Ecliptic System) и способ обнаружения по мюонографиям в этой системе гелиосферных возмущений, вызванных воздействиями неоднородностей межпланетного магнитного поля на поток заряженных первичных космических лучей [67, 139, 149].

2. Эксперимент на мюонном годоскопе УРАГАН

Получены мюонографии, содержащие ~ 1.5 триллиона зарегистрированных мюонов, для которых:

2.1. Проведено сопоставление данных по вариациям скорости счета МГ УРАГАН и нейтронных мониторов, в том числе во время гелиосферных и магнитосферных возмущений. При сопоставлении было показано, что среднемесячные значения суточных среднеквадратичных отклонений данных мюонного годоскопа УРАГАН и нейтронных мониторов MOSC и APTY коррелируют с коэффициентами 0.84 и 0.78 соответственно [91].

2.2. Впервые изучены долговременные вариации проекций вектора локальной анизотропии в период с 2007 по 2020 гг. Показано, что в вариациях вектора локальной анизотропии в диапазоне зенитных углов $25^{\circ} \leq \theta < 76^{\circ}$ присутствуют все известные периоды, обусловленные вращательными движениями Земли, Луны и Солнца. Установлены устойчивые среднегодовые суточные корреляции между проекциями на ось юг-север A_S и на ось восток-запад A_E [90].

2.3. Получены корреляции среднемесячных значений проекции вектора относительной анизотропии r_h со среднемесячными значениями параметров межпланетного магнитного поля B_t и индексами геомагнитной активности Kp. Выявлено, что наилучшие корреляции наблюдаются в период с 2007 по 2017 гг. между параметрами r_h и B_t (коэффициент корреляции составляет ~ 0.76), а также между параметрами r_h и Kp (коэффициент корреляции составляет ~ 0.77). В период с 2018 по 2020 гг. проявляется аномальное поведение корреляционных зависимостей [81].

3. Основные результаты применения метода мюонографии:

3.1. Впервые получены мюонографии GLE (ground-level enhancements) в локальной и GSE системах, позволяющие прямым методом исследовать угловые изображения коллимированного сгустка релятивистских солнечных протонов, выброшенных из Солнца [104].

3.2. Показано, что изменения относительной анизотропии вариаций потока мюонов (r_S и r_E) во время форбуш-понижений наблюдаются в основном на фазах падения и минимума ФП и в среднем соответствуют восточно-западной вариации анизотропии первичных космических лучей [123,133].

3.3. Впервые получены GSE-отображения деформаций углового распределения космических лучей на основе анализа последовательностей мюонографий, для гелиосферных возмущений, вызванных корональными выбросами масс, выявлены особенности регистрации геоэффектиных и негеоэффектиных КВМ в различные периоды солнечной активности [137, 138, 139].

3.4. Установлено, что в периоды минимумов солнечной активности (2008 – 2010 гг., 2017 – 2019 гг.) в (72 ± 4)% возмущений, вызванных высокоскоростным солнечным ветром, наблюдалось повышение потока космических лучей в среднем за (18 ± 4) часов до начала магнитного возмущения на Земле [141, 150].

3.5. Впервые проведено сопоставление мюонографий и карт доплеровского радиолокатора во время грозовых явлений (ГЯ). Выявлено, что более чувствительными к атмосферным возмущениям являются параметры анизотропии потока мюонов, которые позволяют идентифицировать ГЯ с вероятностью около 70%, а при сопровождении ГЯ теплым и холодным фронтами – с эффективностью более 80%, также выявлено, что в основном анизотропия потока мюонов наблюдается при высотах тропопаузы, составляющих больше 10.5 км, и высотах верхней границы облачности более 9.5 км, что хорошо согласуется с данными о высоте генерации мюонов в атмосфере (10 – 20 км) [154, 157, 159].

Таким образом, в результате выполнения диссертационной работы разработан и реализован новый метод дистанционного исследования космического и околоземного пространства в потоке мюонов космических лучей – метод мюонографии, позволяющий качественно и количественно изучать возмущения в межпланетном и околоземном пространстве и прослеживать динамику их развития. Применение этого метода с целью анализа результатов длительного эксперимента (2007 – 2020 гг.), проводимого на мюонном годоскопе УРАГАН, позволило получить целый ряд новых научных результатов в физике космических лучей и солнечно-земных связей. Полученные результаты лягут в основу развития сети мюонных годоскопов для непрерывного наблюдения за солнечными событиями, возмущениями в магнитном поле и атмосфере Земли.

В заключение, выражаю искреннюю и глубокую признательность моему учителю профессору Петрухину Анатолию Афанасьевичу за помощь, поддержку и непрерывное внимание к работе на протяжении всей моей деятельности в Научно-образовательном центре НЕВОД, за создание в Центре творческой атмосферы и большого дружного коллектива единомышленников, сделавших возможным выполнение моей работы.

Особую благодарность хочу выразить профессору Борогу Владимиру Викторовичу, главному научному сотруднику Кокоулину Ростиславу Павловичу и профессору Яшину Игорю Ивановичу за творческое сотрудничество, критические замечания и постоянный интерес к работе.

Хочу выразить благодарность доценту Астапову Ивану Ивановичу, доценту Дмитриевой Анне Николаевне и ведущему инженеру Шутенко Виктору Викторовичу за ценные советы и помощь при разработке методов анализа экспериментальных данных и в подготовке диссертации.

Отдельную благодарность хочу выразить В.В. Шутенко, К.Г. Компанийцу и Д.В. Чернову и всем сотрудникам НОЦ НЕВОД за огромный вклад в обеспечение непрерывного эксперимента и получение долговременных экспериментальных данных на мюонном годоскопе УРАГАН.

Также хочу поблагодарить своих коллег А.Ю.Коновалову и Ю.Н.Мишутину, а также студентов и аспирантов, выполнявших совместные исследования за помощь при анализе и обработке экспериментальных данных.

Я глубоко признательна всем сотрудникам НОЦ НЕВОД, обеспечивающим возможность проведения исследований на уникальных установках экспериментального комплекса, за их постоянную поддержку и внимание.

Я также признательна коллегам из других институтов, участвовавших в обсуждениях результатов исследований, отраженных в диссертации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Bieber, P. Evenson. Spaceship Earth – an optimized network of neutron monitor. Proceedings of the 24th ICRC, Rome. 1995. Vol. 4, pp. 1316 – 1319.
2. NMDB (Neutron Monitor Database) station. URL: http://www01.nmdb.eu/station/ (дата обращения: 27.04.2022).
3. V.P. Chuprova, S.K. Gerasimova, V.G. Grigoryev, P.A. Krivoshapkin, G.F. Krymsky, etal. The brief history of experimental research of cosmic ray variations in Yakutia. Advances in Space Research. 2009. V. 44, pp. 1200 – 1206. DOI: 10.1016/j.asr.2008.12.02.
4. С.А. Стародубцев. Флуктуации интенсивности космических лучей в 11-летнем цикле солнечной активности. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, специальность 01.03.03 «Физика Солнца», ИКФИА СО РАН им. Ю.Г. Шафера. Якутск, 2014. С. 239.
5. Мюонный телескопы, сайт ИКФИА СО РАН: URL: https://ikfia.ysn.ru/myuonnye-teleskopy/ (дата обращения: 27.04.2022).
6. G.I. Britvich, V.V. Brekhovskikh, V.K. Semenov, S.A. Kholodenko. The main characteristics of polystyrene scintillators produced at the Institute of high-energy physics and detectors on their basis. Instruments and Experimental Techniques. 2015. Vol. 58, № 2, pp. 211 – 220. DOI: 10.1134/S0020441215020153.
7. Г.Ф. Крымский, П.А. Кривошапкин, В.П. Мамрукова, С.К. Герасимова. Гелиосферная модуляция интенсивности космических лучей высоких энергий. I. Базовая модель модуляции космических лучей с циклом солнечной активности. Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2007. Т.31, № 2, с. 214 – 221.
8. Данные якутского мюонного телескопа. URL: http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/currents_real_time.html (дата обращения: 27.04.2022).
9. V.G. Grigoryev, S.A. Starodubsev, P.A. Krivoshapkin, A.N. Prikhodko, A.G. Yegorov. Cosmic ray anisotropy based on Yakutsk station in real time. Advances in Space Research. 2008. Vol. 41, pp. 943 – 946. DOI: 10.1016/j.asr.2007.04.072.
10. В.Л. Янчуковский. Регистрация направленной интенсивности космических лучей. Новосибирск: ИГиГ. Препринт ИГиГ СО АН СССР №20. 1986. 24 с.
11. В.Л. Янчуковский. Телескоп космических лучей. Солнечно-земная физика. 2006. Т. 9, с. 41 – 43.

12. В.Л. Янчуковский, В.Е. Сдобнов. Многоканальный наблюдательный комплекс космических лучей как составляющая мировой сети станций. Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 7, №. 6, с. 920 – 922.
13. В.Л. Янчуковский. Температурная зависимость больших пропорциональных счетчиков для регистрации космических лучей. Препринт № 13, Институт геологии и геофизики СО АН.1990. 11 с.
14. В.Л. Янчуковский, В.С. Кузьменко. Температурные коэффициенты интенсивности мюонов в атмосфере. Известия РАН. Серия физическая. 2013.Т. 77, № 5, с. 634 – 636.
15. В.Л. Янчуковский, В.С. Кузьменко. Температурный эффект мюонов в атмосфере. Солнечно-земная физика. 2013.№ 22, с. 65 – 67.
16. Описание мюонного телескопа в Нагое (NGY, Япония). URL: http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/Docs/DetectorDescription_NGY.pdf (дата обращения: 27.04.2022).
17. R.R.S. Mendonca, C. Wang, C.R. Braga, E. Echer, A. Dal Lago, et al. Analysis of cosmic rays' atmospheric effects and their relationships to cutoff rigidity and zenith angle using Global muon detector network data. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2019. Vol. 124, № 12, pp. 9791 – 9813. DOI: 10.1029/2019JA026651.
18. M. Rockenbach, A. Dal Lago, N.J. Schuch, K. Munakata, T. Kuwabara, et al. Global muon detector network used for space weather applications. Space Science Reviews. 2014. Vol. 182, pp. 1 – 18. DOI: 10.1007/s11214-014-0048-4.
19. Описание мюонного телескопа Хобарт (HBT, Австралия). URL: http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/Docs/GMDN_Detectors_Description_NEW_HBT.pdf (дата обращения: 27.04.2022).
20. Описание мюонного телескопа в Кувейте (KWT, Кувейт). URL: http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/Docs/DetectorDescription_KWT.pdf (дата обращения: 27.04.2022).
21. Описание мюонного телескопав Сан-Мартинью-да-Серра (SMS, Бразилия). URL: http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/Docs/DetectorDescription_SMS.pdf (дата обращения: 27.04.2022).
22. Global Muon Detector Network (GMDN) data. URL: http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php (дата обращения: 27.04.2022).
23. Y. Okazaki, A. Fushishita, T. Narumi, C. Kato, S. Yasue, et al. Drift Effects and the Cosmic Ray Density Gradient in a Solar Rotation Period: First Observation with the Global Muon

Detector Network (GMDN). The Astrophysical Journal. 2008. Vol. 681, iss.1, pp. 693 – 707. DOI: 10.1086/588277.

24. K. Munakata, J.W. Bieber, S. Yasue, C. Kato, M. Koyama, et al. Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network. Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105, iss. A12, pp. 27457 – 27468. DOI: 10.1029/2000JA000064.

25. K. Munakata, T. Kuwabara, J.W. Bieber, S. Yasue, C, Kato, et al. CME geometry deduced from cosmic ray anisotropy. Proceedings of the 28th ICRC, Tsukuba. 2003. pp. 3561 – 3564. Bibcode: 2003ICRC....6.3561M.

26. K. Munakata, T. Kuwabara, J.W. Bieber, P. Evenson, R.Pyle, et al. CME-geometry and cosmic-ray anisotropy observed by a prototype muon detector network. Advances in Space Research. 2005. Vol. 36, iss. 1, pp. 2357 – 2362. DOI: 10.1016/j.asr.2003.05.064.

27. T. Kuwabara, K. Munakata, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, et al. Geometry of an interplanetary CME on October 29, 2003 deduced from cosmic rays. Geophysical Research Letters.2004. Vol. 31, iss. 19, L19803. DOI: 10.1029/2004GL020803.

28. S.E. Forbush On the effects in the cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. Physical Review. 1937. Vol. 51, pp. 1108 – 1109.

29. V.F. Hess, A. Demmelmair. World-wide effects in cosmic ray intensity, as observed during a recent magnetic storm. Nature.1937. Vol. 140, pp. 316 – 317.

30. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Струминский А.Б., Янке В.Г. Чем обусловлены и с чем связаны форбуш-эффекты? Известия РАН. Серия физическая. 2001. Т. 65, № 3, с. 373 – 376.

31. A. Fushishita, T. Kuwabara, C. Kato, S. Yasue, J.W. Bieber, et al. Precursors of the Forbush Decrease on 2006 December 14 Observed with the Global Muon Detector Network (GMDN). Astrophysical Journal. 2010. Vol. 715, iss. 2, pp. 1239 – 1247. DOI: 10.1088/0004-637X/715/2/1239.

32. T. Kuwabara, J. W. Bieber, J. Clem, P. Evenson, R. Pyle, et al. Real-time cosmic ray monitoring system for space weather. Space Weather. Vol. 4, S08001. DOI: 10.1029/2005SW000204.

33. Space Weather Prediction with Cosmic Rays. URL: http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/welcome.html (дата обращения: 27.04.2022).

34. Y. Ohashi, A. Okada, T. Aoki, et al. New narrow angle muon telescope at Mt. Norikura. Proceedings of the 25th ICRC, Durban. 1997. Vol. 1, pp. 441 – 444.

35. K. Fujimoto, A. Okada, T. Aoki, K. Mitsui, H. Kojima and Y. Ohashi. Observation of Forbush decrease by the narrow angle muon telescope at Mt. Norikura. Proceedings of the 27th ICRC, Hamburg. 2001. Pp. 3523 – 3526. Bibcode: 2001ICRC....9.3523F.

36. K. Fujimoto, A. Okada, T. Aoki, Y. Ohashi, K. Mitsui, H. Kojima. Observation of precursory decrease by the narrow angle muon telescope at MT. Norikura. Proceedings of the 28th ICRC, Tsukuba. 2003. Vol. 6, pp. 3565 – 3568. Bibcode: 2003ICRC....6.3565F.
37. .K. Munakata, T. Kuwabara, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, et al. A "loss-cone" precursor of an approaching shock observed by a cosmic-ray muon hodoscope on October 28, 2003. Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32, iss. 3, L03S04. DOI:10.1029/2004GL021469.
38. J. Poirier, C. D'andrea, E. Fidler, J. Gress, M. Herrera, et al. Status report on project GRAND. Proceedings of the 30th ICRC, Merida. 2007. Vol. 5 (HE part 2), pp. 1577 –1580.
39. Y. Hayashia, Y. Aikawaa, N. V. Gopalakrishnanb, et al. A large area muon tracking detector for ultra-high energy cosmic ray astrophysics – the GRAPES-3 experiment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2005. Vol. 545, no. 3, pp. 643 – 657. DOI: 10.1016/j.nima.2005.02.020.
40. B. Adeva, M. Aguilar-Benitez, H. Akbari, J. Alcaraz, A. Aloisio, et al. The construction of the L3 experiment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1990. Vol. 289, iss. 1 – 2, pp. 35 – 102. DOI: 10.1016/0168-9002(90)90250-A.
41. S. Kawakami, K. Fujimoto, S. K. Gupta, et al. Search of mu ons in association with large solar flares with the GRAPES-3 MMT at Ooty. Proceedings of the 28th ICRC, Tsukuba. 2003, pp. 3405 – 3408. Bibcode: 2003ICRC....6.3405K.
42. A. Chilingarian, G. Hovsepyan, K. Arakelyan, S. Chilingaryan, V. Danielyan, et al. Space environmental viewing and analysis network (SEVAN). Earth, Moon and Planets. 2009. Vol. 104, iss. 1 – 4, pp. 195 – 210. DOI: 10.1007/s11038-008-9288-1.
43. A. Chilingarian, V. Babayan, T. Karapetyan, B. Mailyan, B. Sargsyan& M. Zazyan. The SEVAN Worldwide network of particle detectors: 10 years of operation. Advances in Space Research. 2018. Vol. 61, pp. 2680 – 2696. DOI:10.1016/j.asr.2018.02.030.
44. N.Nikolova, K. Kudela, R. Langer, I. Strharsky, I. Angelov, et al. SEVAN detector measurements at BEO Moussala and Lomnický Štít: First experience from 2014 – 2017 AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2075, 130028. DOI: 10.1063/1.5091313.
45. A. Chilingarian, G. Hovsepyan, M. Zazyan. Mu on Tomography of Charged Structures in the Atmospheric Electric Field. Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48, iss. 17, e2021GL094594. DOI: 10.1029/2021GL094594.

46. A. Chilingarian, G. Hovsepyan, M. Zazyan. Measurement of TGE particle energy spectra: An insight in the cloud charge structure. EPL. 2021. Vol. 134, 69001 DOI: 10.1209/0295-5075/ac0dfa.
47. A. Blanco, J.J. Blanco, J. Collazo, P. Fonte, J.A. Garzon, et al. TRAGALDABAS: a new RPC based detector for the regular study of cosmic rays. Journal of Instrumentation. 2014. Vol. 9, C09027. DOI: 10.1088/1748-0221/9/09/C09027.
48. D. Belver, P. Cabanelas, D. Dominguez, J.A. Garzon, G. Kornakov. TRASGO: A proposal for a timing RPCs based detector for analyzing cosmic ray air showers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2012. Vol. 661, pp. S163 – S167. DOI: 10.1016/j.nima.2010.09.173.
49. R. Hippler, A. Mengel, F. Jansen,G. Bartling,W. Göhler,et al. First spaceweather observations at MuSTAnG - The muon spaceweather telescope for anisotropies at greifswald. Proceedings of the 30th ICRC, Merida. 2007. Vol. 1 (SH), pp. 347 – 350.
50. S. Banjac,D.Galsdorf, B.Heber, K.Herbst, C.Wallmann.Current status of MuSTAnG at the Christian-Albrechts-University Kiel. The 34th ICRC 2015, Hague. Poster. ID1026. URL: https://indico.cern.ch/event/344485/contributions/1744774/attachments/1135098/1623881/forprint.pdf (дата обращения: 27.04.2022).
51. The Aragats Multichannel Muon Monitor (AMMM). URL: http://crd.yerphi.am/ammm (дата обращения: 27.04.2022).
52. A Chilingarian, K Avakyan, V Babayan, N Bostanjyan, S Chilingarian, et al. Aragats space-environmental centre: Status and SEP forecasting possibilities. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2003 Vol. 29, iss. 5, pp. 939 – 951. DOI: 10.1088/0954-3899/29/5/314.
53. K. Arakelyan, A. Avetisyan, V. Babayan, A. Chilingarian, S. Chilingarian, V. Danielyan.Nor-Amberd multidirectional muon monitor: new detector for the world-wide. Proceedings of the 29th ICRC, Pune. 2005, Vol. 2, pp. 445 – 448.
54. В.В. Борог, А.Ю. Буринский, В.В.Дронов. Мюонный годоскоп для исследования солнечно-земных связей в области энергий больше 10 ГэВ. Известия РАН. Серия физическая. 1995. Т. 59, № 4, с. 191 – 194.
55. В.В. Борог, В.В. Дронов. Изучение короткопериодических колебаний интенсивности мюонов, связанных с конвективно-грозовыми явлениями в атмосфере Земли. Известия РАН. Серия физическая. 1999. Т. 63, № 8, с. 1675 – 1677.

56. В.В. Борог, В.В.Дронов. Изучение динамических процессов в гелиосфере с помощью мюонного годоскопа. Астрономический вестник. 2000. Т. 34, № 2, с. 126 – 130.
57. В.В. Борог. Мюонная томография. Труды 1-й Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики. Нальчик. 2000. С. 129 – 136.
58. В.В. Борог. Основы мюонной диагностики: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008, 160 с.
59. D.A. Timashkov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, J.-N. Capdevielle, R.P. Kokoulin, et al. Muon diagnostics of the Earth's atmosphere, near-terrestrial space and heliosphere: First results and perspectives. Proceedings of the 30th ICRC, Merida. 2007. Vol. 1, pp. 685 – 688.
60. Н.С. Барбашина, В.В. Борог, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец и др. Мюонная диагностика атмосферы и магнитосферы Земли. Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71, № 7, с. 1069 – 1071.
61. В.В. Шутенко, Н.С. Барбашина, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, Д.А. Тимашков, И.И. Яшин. Наблюдение гелиосферных возмущений в мюонной компоненте космических лучей. Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73, № 3, с. 364 – 367 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2009. Vol. 73, no. 3, pp. 347 – 349).
62. Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец, А.С. Михайленко, А.А. Петрухин и др. Исследование динамики глобальных возмущений магнитосферы Земли с помощью мюонных детекторов. Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010. № 6, с. 3 – 5 (Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2010. Vol. 37, no 6, pp. 165 – 166).
63. Н.С. Барбашина, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, Д. Маннокки, А.А. Петрухин и др. Широкоапертурный мюонный детектор для диагностики атмосферы и магнитосферы Земли. Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71, № 7, с. 1072 – 1074.
64. Н.С. Барбашина, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, G. Mannocchi, А.А. Петрухин и др. Широкоапертурный мюонный годоскоп большой площади УРАГАН. Приборы и техника эксперимента. 2008. № 2, с 26 – 32 (Instruments and Experimental Techniques. 2008. Vol. 51, no. 2, pp. 180 – 186).
65. Н.С. Барбашина, В.В. Борог, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, Д.А. Тимашков, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Способ и устройство для получения мюонографий. Патент РФ на изобретение № 2406919 от 20.12.2010 г.

66. N.S. Barbashina, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko. Method of muonography and prospects of its further development. Physics of Atomic Nuclei. 2021. Vol. 84, iss. 6, pp. 1182 – 1194. DOI: 10.1134/S1063778821130044.

67. И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, В.В. Борог, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Способ обнаружения гелиосферных возмущений. Патент РФ на изобретение № 2446495 от 27.03.2012 г.

68. И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, В.В. Борог, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Устройство для измерения вариаций плотности атмосферы. Патент РФ на полезную модель № 110531 от 20.11.2011 г.

69. И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, В.В. Борог, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Устройство для обнаружения вариаций внутренних гравитационных волн в атмосфере. Патент РФ на полезную модель № 112778 от 20.01.2012 г.

70. Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева. Определение характеристик форбуш-понижений в потоке частиц космических лучей на поверхности Земли. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663802 от 10.01.2017 г.

71. И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, Н.В. Осетрова, В.В. Шутенко. Программа для выделения областей повышенной и пониженной интенсивности потока космических лучей в GSE координатах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664452 от 13.11.2020 г.

72. Nagoya Multi-Directional Muon Telescope, Cosmic-Ray Research Section,Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, 464-8601 Japan. URL: http://cr0.izmiran.ru/gmdnet/Publication/About%20Nagoya%20Multi-Directional%20Muon%20Telescope.pdf (дата обращения: 27.04.2022).

73. Н.В. Ампилогов, Н.С. Барбашина, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, С.С. Хохлов и др. Применение мюонного годоскопа УРАГАН для калибровки детекторов заряженных частиц. Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 3, с. 420 – 422.

74. I.I. Yashin, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, E.I. Yakovleva. Real-time data of muon hodoscope URAGAN. Advances in Space Research. 2015. Vol. 56, iss.12, pp. 2693 – 2705. DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.003.

75. А.Н. Дмитриева, Н.В. Ампилогов, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.А. Ковыляева и др. Вариации энергетического спектра первичных космических лучей

в 2007–2015 гг. по данным мюонного годоскопа УРАГАН. Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 2, с. 176 – 178. DOI: 10.7868/S036767651702017X.

76. A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, A.A. Petrukhin, D.A. Timashkov. Corrections for temperature effect for ground based mu on hodoscopes. Astroparticle Physics. 2011. Vol. 34, pp. 401 – 411. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2010.10.013.
77. A. Dmitrieva, N. Ampilogov, I. Astapov, N. Barbashina, V. Borog, et al. Temperature effect corrections for URAGAN based on CAO, GDAS, NOAA data. Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 632, 012054.DOI: 10.1088/1742-6596/632/1/012054.
78. Л.И. Дорман. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972.
79. L.I. Dorman. Cosmic rays in the Earth’s atmosphere and underground. Astrophysics and Space Science Library. 2004. Vol. 303. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
80. Ю.А.Глаголев. Справочник по физическим параметрам атмосферы. Гидрометеоиздат, 1970. Ленинград.
81. I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, A.A. Petrukhin, et al. Local anisotropy of muon flux - the basis of the method of muon diagnostics of extra-terrestrial space. Advances in Space Research. 2015. Vol. 56, iss.12, pp. 2713 – 2718. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.039.
82. Н.С Барбашина. Методика исследования форбуш-эффектов в потоке мюонов космических лучей, регистрируемых в годоскопическом режиме. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, специальность 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», НИЯУ МИФИ, 2013. С. 135.
83. Страница представления данных мюонного годоскопа УРАГАН уникальной научной установки «Экспериментальный комплекс НЕВОД». URL: http://nevod.mephi.ru/uragan_data.htm (дата обращения: 27.04.2022).
84. CXFORM: Coordinate transformation package for IDL and C. URL: https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/software/old/selected_software_from_nssdc/coordinate_transform/ (дата обращения: 27.04.2022).
85. E.O. Wollan. Present Status of solar and sidereal time variation of cosmic rays. Reviews of modern physics. 1939. Vol. 11, pp. 160 – 165. DOI: 10.1103/RevModPhys.11.160.1939.
86. Л.И. Дорман, Е.Л. Фейнберг. Вариации космических лучей. Успехи физических наук. 1956. Т. 59, № 6, с. 189 – 228.

87. R.M. Briggs, R.B. Hicks, S. Standil. Periodic solar time variations in the cosmic ray muon component near sea level. Journal of Physics A: General Physics. 1969. Vol. 2, pp. 584 – 590.
88. A. Belov. Large scale modulation: view from the Earth. Space Science Reviews. 2000. Vol. 93, № 1 – 2, p. 79 – 105.
89. A.V. Belov, E.A. Eroshenko, V.A. Oleneva, V.G. Yanke, H. Mavromichalaki. Long term variations of the cosmic ray anisotropy by the data from world wide neutron monitor network. Proceedings of the 20th ECRS, Lisbon. 2006.
90. В.В. Шутенко, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин и др. Долговременные вариации углового распределения потока мюонов. Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 5. с. 611-619. DOI: 10.7868/S0016794013050155. (Geomagnetism and Aeronomy. 2013. Vol. 53, no. 5, pp. 571 – 579).
91. N.S. Barbashina, I.I. Astapov, A.N. Dmitrieva, A.Yu. Konovalova, K.G. Kompaniets, et al. Comparison of muon hodoscope URAGAN and neutron monitors' data for 2008 – 2014. Proceedings of Science. 2015. PoS (ICRC2015) 130.
92. Moscow Neutron Monito. URL: http://cr0.izmiran.ru/mosc/ (дата обращения: 27.04.2022).
93. Apatity Neutron Monitor. URL: http://pgia.ru/cosmicray/ (дата обращения: 27.04.2022).
94. SILSO Database. URL. http://sidc.oma.be/silso/datafiles (дата обращения: 27.04.2022).
95. OMNI Database. URL. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ (дата обращения: 27.04.2022).
96. Thatcher L.J., Müller H.-R. Statistical investigation of hourly OMNI solar wind data. Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116, A12107. DOI: 10.1029/2011JA017027.
97. И.И. Астапов. Мюонная диагностика корональных выбросов массы по данным координатно-трекового детектора УРАГАН. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, специальность 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», НИЯУ МИФИ, 2018. С. 104.
98. А.А. Абунин, М.А. Абунина, А.В. Белов и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом. Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52, № 3, с. 313 – 320.
99. Л.И. Мирошниченко, Э.В. Вашенюк, Х.А. Перес-Пераса. Солнечные космические лучи: 70 лет наземных наблюдений. Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 5, с. 579 – 600.
100. Yu. Balabin, B. Gvozdevsky, A. Germanenko, E. Maurchev. GLE events in 24th solar cycle. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 62, 01006. DOI: 10.1051/e3sconf/20186201006.
101. J. Perez Peraza, I. Libin. Highlights in Helioclimatology. 2012. Boston: Elsevier, 284 p.

102. S. Poluianov, I. Usoskin, A. Mishev, M. Shea and D. Smart. GLE and Sub-GLE Redefinition in the Light of High-Altitude Polar Neutron Monitors. Solar Physics. 2017. Vol. 292, 176. DOI: 10.1007/s11207-017-1202-4.
103. A. Mishev and I. Usoskin. Analysis of sub-GLE and GLE events using NM data: space weather applications. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1181, 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/1181/1/012006.
104. D.A. Timashkov, Yu.V. Balabin, N.S. Barbashina, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, et al. Ground level enhancement of December 13, 2006 observed by means of muon hodoscope. Astroparticle Physics. 2008. Vol. 30, pp. 117 – 123. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2008.07.008.
105. Space Weather Prediction Center/NOAA, GOES data. URL: https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux (дата обращения: 27.04.2022).
106. V.G. Grigoryev, S.A. Starodubtsev, P.A. Krivoshapkin, V.P. Mamrukova, V.M. Migunov, A.N. Prikhodko, V.P. Chuprova. Ground Level Enhancement of December 13, 2006 by the ground measurement data. Proceedings of the 30th ICRC, Merida. 2007. Vol. 1 (SH), pp. 233 – 236.
107. C. Plainaki, H.Mavromichalaki , A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke. Application of the NM-BANGLE model to GLE 70. Proceedings of the 30th ICRC, Merida. 2007. Vol. 1 (SH), pp. 281 – 284.
108. E.V. Vashenyuk, G.A. Bazilevskaya, Y.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, V.S. Makhmutov. The GLE of December 13, 2006 according to the ground level and balloon observations. Proceedings of the 30th ICRC, Merida. 2007. Vol. 1 (SH), pp. 221 – 224.
109. IZMIRAN Database. URL: https://www.izmiran.ru/data/?LANG=ru (дата обращения: 27.04.2022).
110. E.V. Vashenyuk, Y. Balabin, L. I. Miroshnichenko, J. Perez-Peraza, A. Gallegos-Cruz. Relativistic solar cosmic ray events (1956-2006) from GLE modeling studies. Proceedings of the 30th ICRC, Merida. 2007. Vol. 1 (SH), pp. 253 – 256.
111. N.A. Tsyganenko. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 2. Parameterization and fitting to observations. Journal of Geophysical Research. 2002. Vol.107, no. A8, 1176. DOI: 10.1029/2001JA000220.
112. Space Weather Prediction Center, ACE data. URL: https://www.swpc.noaa.gov/products/ace-real-time-solar-wind (дата обращения: 27.04.2022).
113. R. Buetikofer, E.O. Flueckiger. Neutron monitor data for Jungfraujoch and Bern during the ground-level solar cosmic ray event on 13 December 2006. Preprint of Physikalisches Institut, University of Bern, 2006.

114. C.J. Hatton, H. Carmichael. Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor. Canadian Journal of Physics. 1964. Vol. 42, pp. 2443 – 2472. DOI: 10.1139/p64-222.
115. E.V. Vashenyuk, Yu. V. Balabin, J. Perez-Peraza, A. Gallegos-Cruzб L.I. Miroshnichenko. Some features of the sources of relativistic particles at the Sun in the solar cycles 21 – 23. Advances in Space Research. 2006. Vol. 38, iss. 3, pp. 411 – 417. DOI: 10.1016/j.asr.2005.05.012.
116. GLE database. URL: http://gle.oulu.fi/#/ (дата обращения: 27.04.2022).
117. A. Mishev, I. Usoskin, E. Valtonen, L. Kocharov, R. Vainio, et al. GLE 72 on 10 September 2017 – an analysis using neutron monitor and space-borne data. 42nd COSPAR Scientific Assembly, Pasadena, California. 2018. ID D2.1–12–18. Bibcode: 2018cosp...42E2298M.
118. A. Mishev, I. Usoskin, O. Raukunen,·M. Paassilta, E. Valtonen, et al. First analysis of Ground-level enhancement (GLE) 72 on 10 September 2017: spectral and anisotropy characteristics. Solar Physics. 2018. Vol. 293, 136. DOI: 10.1007/s11207-018-1354-x.
119. А.В. Белов, Е.А. Ерошенко, В.Г. Янке, В.А. Оленева, М.А. Абунина, А.А. Абунин. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов. Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58, № 3, с. 374 – 389.
120. Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, Д.А. Тимашков и др. Особенности исследования форбуш-эффектов в потоке мюонов. Известия РАН. Серия физическая. 2009.Т. 73, № 3, с. 360 – 363 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2009. Vol. 73, no. 3, pp. 343 – 346).
121. E.I.Yakovleva, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva, A.A.Kovylyaeva, etal. Energy characteristics of Forbush decreases for different types of heliospheric disturbances according to muon hodoscope URAGAN. Physics Procedia. 2015. Vol. 74, pp. 470 – 477. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.234.
122. Е.И. Яковлева, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, А.А. Ковыляева и др. Исследование временных изменений амплитудных спектров форбуш-понижений для различных типов гелиосферных возмущений. Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 5, с. 685 – 687 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. Vol. 79, no. 5, pp. 631 – 633).
123. Н.С. Барбашина, И.И. Астапов, В.В. Борог, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин и др. Изменения относительной анизотропии потока мюонов во время форбуш-понижений по данным МГ УРАГАН. Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 5, с. 688 – 690 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. Vol. 79, no. 5, pp. 634 – 636).

124. Н.С. Барбашина, И.И.Астапов, В.В. Борог, А.Н.Дмитриева, Л.И. Душкин и др. Исследование энергетических, угловых и временных характеристик форбуш-эффектов, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН. Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 6, с. 863 – 866 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. Vol. 75, no. 6, pp. 814 – 817).
125. N.S. Barbashina, I.I. Astapov, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, et al. Study of characteristics of Forbush decreases detected in 2006 – 2011 by means of muon hodoscope URAGAN. Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 409, 012189. DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012189.
126. N.S. Barbashina, N.V. Ampilogov, I.I. Astapov, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, et al. Characteristics of the Forbush decrease of 22 June 2015 measured by means of the muon hodoscope URAGAN. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 675, 032038. DOI:10.1088/1742-6596/675/3/032038.
127. Л.И. Дорман. Вариации космических лучей и исследование космоса. М.: АН СССР. 1963. 1028 с.
128. Е.И. Яковлева, А.Г. Богданов, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин, А.А. Петрухин, Д.А. Тимашков. Функции связи для мюонных годоскопов. Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73, № 3, с. 375 – 378.
129. N.S. Barbashina, I.I. Astapov, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, et al. Investigations of Forbush decreases by means of muon hodoscope. Proceedings of science. 2015. PoS (ICRC2015) 133.
130. A. Wawrzynczak, M.V. Alania. Modeling and data analysis of a Forbush decrease. Advances in Space Research. 2010. Vol. 45, iss. 5, pp. 622 – 631. DOI: 10.1016/j.asr.2009.09.005.
131. A.A. Kovylyaeva, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, et al. Forbush decreases during 2007 – 2018 according to the muon hodoscope URAGAN data. Physics of Atomic Nuclei. 2019. Vol. 82, №. 6, pp. 892 – 896. DOI: 10.1134/S1063778819660323.
132. Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976 – 2000 гг. Космические исследования. 2009. Т. 47, № 2, с. 81 – 94.
133. N. Barbashina, N. Ampilogov, I. Astapov, V. Borog, A. Dmitrieva, etal. Local anisotropy of mu on flux during Forbush decreases from URAGAN data. Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 632, 012049. DOI:10.1088/1742-6596/632/1/012049.
134. CACTus catalogue. URL: http://sidc.be/cactus (дата обращения: 27.04.2022).

135. А.И. Алексеев, А.М. Анохина, В.В. Бенгин, В.И. Галкин, В.В. Калегаев и др. Космические исследования и взаимодействия космической среды с системами и материалами космических аппаратов. Электронный учебник. URL: http://www.hep.by/gnu/nuclphys/cosm/index.html (дата обращения: 27.04.2022).

136. I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.S. Veselovsky. Powerful non-geoeffective interplanetary disturbance of July 2012 observed by muon hodoscope URAGAN. Advances in Space Research. 2015. Vol. 56, iss.12, pp. 2833 – 2838. DOI: 10.1016/j.asr.2015.03.002.

137. И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, В.В. Борог, И.С. Веселовский, Н.В. Осетрова и др. Исследование геоэффективных и негеоэффективных КВМ по данным МГ УРАГАН. Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 2, с. 202 – 205. DOI: 10.7868/S0367676517020041.

138. I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva, A.Yu. Konovalova, N.V. Osetrova, et al. Invesigation of the local anisotropy of cosmic ray muon flux during coronal mass ejections in 2007–2018. Physics of Atomic Nuclei. 2019. Vol. 82, № 6, pp. 874 – 878.DOI: 10.1134/S1063778819660074.

139. I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva, I.A. Melnikova, N.V. Osetrova, et al. Investigation of local deformations of muon flux angular distribution during CME with GSE-mapping technique. Journal of Physics: Conference Series.2019. Vol. 1390, 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/1390/1/012067.

140. A.Yu. Konovalova, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, N.V. Osetrova, Y.N. Mishutina, et al. Analysis of muon flux variations caused by high-speed solar wind during periods of low solar activity. Physics of Atomic Nuclei. 2019. Vol. 82, №. 6, pp. 909 – 915. DOI: 10.1134/S1063778819660311.

141. N.V. Osetrova, I.I. Astapov, N.S. Barbashina and A.Y. Konovalova. Criteria for early prediction of geomagnetic disturbances caused by coronal holes during periods of low solar activity based on muon flux variations. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1690, 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012019.

142. A. Papoulis, S.U. Pillai. Probability, random variables and stochastic processes. McGraw-Hill, New York. 2002.

143. C.T. Russell, R.A. Mewaldt, J.G. Luhmann, et al. The very unusual interplanetary coronal mass ejection of 2012 July 23: a blast wave mediated by solar energetic particles. Astrophysical Journal. 2013. Vol. 770, p. 38. DOI: 10.1088/0004-637X/770/1/38.

144. M.D. Cash, D.A. Biesecker, V. Pizzo, C.A. De Koning, G. Millward, et al. Ensemble modeling of the 23 July 2012 coronal mass ejection. Space Weather. 2015. Vol. 13, iss.10, pp. 611 – 625. DOI: 10.1002/2015SW001232.

145. iNTEGRATED SPACE WEATHER ANALYSIS SYSTEM (iSWA). URL: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/iswa/ (дата обращения: 27.04.2022).

146. E. Robbrecht and D. Berghmans. Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data. Astronomy and Astrophysics. 2004. Vol. 425 (3), pp. 1097 – 1106. DOI: 10.1051/0004-6361:20041302.

147. C.A. Loewe, G.W. Prolss. Classification and mean behavior of magnetic storms. Journal of geophysical research. 1997. Vol. 102, №. A7, pp. 14209 – 14213.

148. I.I. Astapov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, I.S. Veselovsky, N.V. Osetrova и др. Investigation of muon flux anisotropy during CME. 2016. arXiv: 1701.00070. DOI: 10.48550/arXiv.1701.00070.

149. И.И. Яшин, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец и др. GSE-отображение деформаций углового распределения потока мюонов, регистрируемого годоскопом УРАГАН, в режиме реального времени. Известия РАН. Серия физическая. 2019.Т. 83, № 5, с. 631 – 634. DOI: 10.1134/S0367676519050405 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83, no. 5, pp. 572 – 575).

150. Н.В. Осетрова, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Ю. Коновалова, В.В. Шутенко. Исследование связи параметров вариаций космических лучей, регистрируемых на земле, с корональными дырами на Солнце. Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 11, с. 1608 – 1610. DOI: 10.31857/S0367676521110284 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85, no. 11, pp. 1269 – 1271).

151. A.A. Petrukhin, N.S. Barbashina, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, et al. Muon diagnostics of the Earth's atmosphere. Proceedings of the 32nd ICRC, Beijing. 2011. Vol. 11, pp. 352 – 355. DOI: 10.7529/ICRC2011/V11/0310.

152. И.И. Яшин, Н.В. Ампилогов, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, В.В. Борог и др. Мюонная диагностика: современный статус. Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77, № 5, с. 621 – 624 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2013. Vol. 77, no. 5, pp. 554 – 557).

153. N. Barbashina, A. Petrukhin, I. Yashin. Muon hodoscope URAGAN as a new meteorological tool. Proceedings of International Symposium TEPA 2016, Armenia. 2016, pp. 106 – 111.

154. А.С. Михайленко, Н.В. Ампилогов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец и др. Изучение вариаций потока мюонов на поверхности Земли по данным мюонного годоскопа во время нестационарных атмосферных процессов. Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75, № 6, с. 877 – 880 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. Vol. 75, no. 6, pp. 827 – 830).
155. Архив погодных условий. Сервер “Погода России”. URL: http://meteo.infospace.ru (дата обращения: 27.04.2022).
156. World Wide Lightning Location Network. URL: http://wwlln.net (дата обращения: 27.04.2022).
157. А.С. Михайленко, Н.В. Ампилогов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец и др. Изучение вариаций потока мюонов на поверхности Земли по данным мюонного годоскопа во время нестационарных атмосферных процессов. 31-я ВККЛ, МГУ. 2010. ГЕО / GEO _6.
158. I.I. Astapov, N.V. Ampilogov, D.V. Chernov, K.G. Kompaniets, A.S. Mikhaylenko, V.V. Shutenko, et al. Study of correlations between thunderstorm phenomena and mu on flux variations. Proceedings of the 32nd ICRC, Beijing. 2011. Vol. 11, pp. 356 – 359. DOI: 10.7529/ICRC2011/V11/0319.
159. Н.С. Барбашина, И.И. Астапов, Т.А. Белякова, А.Н. Дмитриева, А.В. Козырев и др. Изучение вариаций потока мюонов, зарегистрированных МГ УРАГАН во время гроз. Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 2, с. 250 – 253. DOI: 10.7868/S0367676517020065 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. Vol. 81, no. 2, pp. 230 – 233).
160. Ю.Б. Павлюков, Н.И. Серебрянник, С.Г. Беликов, Н.А. Безрукова, Е.Л. Савёлов и др. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора DMRL-C в синоптической практике. Москва. 2014. С. 110. URL: http://map.meteorad.ru/static/VMU-DMRL-140701.pdf (дата обращения: 27.04.2022).

ПРИЛОЖЕНИЕ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЮОНОГРАФИИ

Основной сложностью при применении метода мюонографии для изучения различных событий является наложение возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере, которые могут происходить одновременно. В настоящее время для их разделения используется разница в длительности анализируемых событий: сутки и часы для гелиосферных и магнитосферных; часы и минуты – для атмосферных. Однако, для более надежного разделения возмущений необходимо наличие нескольких мюонных годоскопов в различных географических точках, расстояния между годоскопами определяются характеристиками решаемых задач.

Для исследования гелиосферных и магнитосферных событий необходимо размещать годоскопы на расстояниях в тысячи километров друг от друга. Атмосферные условия в этих точках будут разными, а гелиосферные возмущения практически одинаковыми, с учетом временного сдвига, что позволит легко разделять такие события. Поэтому для дальнейшего развития метода мюонографии необходимо создание сети мюонных годоскопов, аналогичной сети нейтронных мониторов. Пример такой сети для проведения гелиосферных исследований на территории России представлен на рисунке П1. Контуры соответствуют областям асимптотических направлений протонов первичных космических лучей с энергиями 38 ГэВ и 63 ГэВ, генерирующих положительные мюоны, которые регистрируются в мюонных годоскопах под зенитным углом 17°. Видно, что такая сеть покрывает практически всю территорию Российской Федерации.

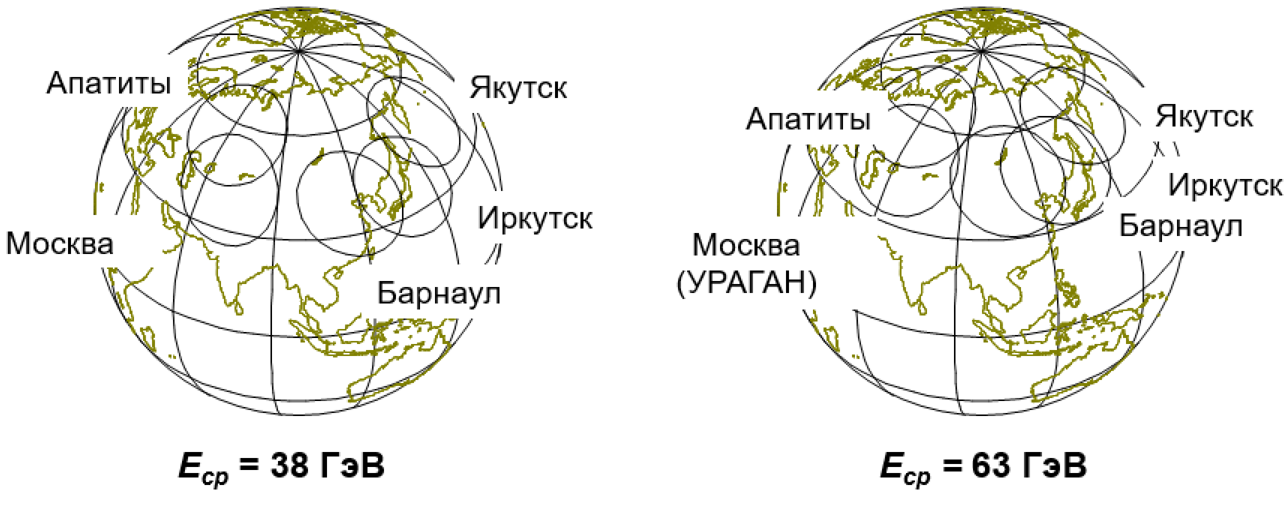


Рисунок П1. Контуры асимптотических направлений протонов с энергиями 38 ГэВ (слева) и 63 ГэВ (справа).

Использование метода мюонографии для раннего обнаружения и прогнозирования дальнейшего развития атмосферных возмущений требует более плотного расположения мюонных годоскопов. В качестве примера на рисунке П2 представлен проект размещения мюонных годоскопов в Московском регионе. Из рисунка видно, что подобное расположение мюонных годоскопов представляет собой «фронтальную антенну» для регистрации возмущений, идущих, как правило, с западного направления, что позволит контролировать состояние атмосферы над регионом и своевременно обнаруживать опасные процессы и явления.

Рисунок П2. Проекции областей, генерирующих мюоны на высоте 16 км в интервале зенитных углов 0° - 70°, на карте Подмосковья.