

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Филиппов Максим Валентинович

**Наземный аппаратно-программный комплекс для исследования вариаций
низкоэнергичной компоненты космических лучей**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Лаборатории физики Солнца и космических лучей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук **Махмутов Владимир Салимгереевич**, ФИАН, заведующий лабораторией

Официальные оппоненты: **Дергачёв Валентин Андреевич**
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Петрухин Анатолий Афанасьевич

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук

Защита диссертации состоится 20 сентября 2021 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.lebedev.ru Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Телефон для справок: +7 (499) 32-65-54

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.023.04

д-р физ.-мат. наук

Баранов Сергей Павлович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Одним из важнейших направлений исследований в физике космических лучей (КЛ) является изучение вариаций потоков КЛ на разных временных масштабах (суточные, 27-дневные, сезонные, годовые и т.д.) и определение физической природы таких вариаций [1,2]. В последние десятилетия вызывают интерес исследования процессов, происходящих в земной атмосфере, которые сопровождаются вариациями потоков КЛ и электромагнитного излучения. Особый класс таких событий представляют световые вспышки и γ -всплески (TLE - и TGF-события), кратковременные возрастания потоков заряженных частиц, охватывающие высоты от приземной атмосферы до ионосферы [3–11]. Последние годы эти явления активно исследуются на наземных установках и с помощью аппаратуры, установленной на спутниках.

В данной работе описаны принципы работы новой наземной научной аппаратуры, для изучения вариаций потоков КЛ. При проектировании аппаратуры основополагающим принципом была модульность. Были разработаны 3 типа детекторов: детектор заряженной компоненты КЛ CARPET, детектор нейтронной компоненты КЛ «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр». В зависимости от поставленных задач, количество модулей каждой установки может изменяться.

Каждый модуль установок CARPET и «Нейтронный детектор» (НД) был оснащён дополнительным каналом передачи метеорологической (атмосферное давление и температура внутри корпуса прибора) и служебной информации (питающие напряжения), что позволяет проводить оценки барометрического и температурного эффектов, а также, исключать возможные аппаратурные эффекты, влияющие на качество ряда данных.

В 2015 – 2017 гг. была создана новая международная сеть установок. На сегодняшний день установки функционируют в непрерывном режиме в 4 точках в разных частях мира: на Долгопрудненской научной станции (ДНС) ФИАН (Московская область, Долгопрудный, N55.56°, E37.3°; жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 2,12$ ГВ), в международном астрономическом комплексе CASLEO (Complejo Astronomico el Leoncito; Аргентина, S31.47°, W69.17°, высота 2550 м над уровнем моря, жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 9,8$ ГВ), в Евразийском национальном университете имени Л.Н. Гумилева (ЕНУ); Нур-Султан, Республика Казахстан, N51.10°, E71.26°; $R_c = 2,9$ ГВ) и в Национальном научном центре KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology; Саудовская Аравия, Эр-Рияд, N24.39°, E46.42°; $R_c = 14,4$ ГВ).

На территории ДНС ФИАН функционируют один модуль CARPET и два модуля НД. В CASLEO: 1 модуль CARPET, 3 модуля НД и 4 модуля «Гамма-спектрометра». В ЕНУ установлены 2 модуля CARPET и 1 модуль НД. В KACST функционируют 2 модуля CARPET.

В данной работе был проведён сравнительный анализ рекуррентных и спорадических (Форбуш-эффектов) вариаций КЛ для установок CARPET и нейтронных мониторов. Показано, что установки CARPET и НД чувствительны к вариациям первичных КЛ. Также в работе проведено исследование возможных корреляций между вариациями потоков КЛ и грозовой активностью.

Цели и задачи работы

Разработка и изготовление модульного наземного комплекса для регистрации заряженной компоненты, нейтронной компоненты и γ -излучения КЛ;

Проверка аппаратуры, разработка методов учёта метеорологических и аппаратурных эффектов в рядах данных;

Первичный анализ данных за 2015-2020 гг.

Научная новизна

Впервые разработана и создана научная аппаратура, ставшая основой для новой международной наземной сети установок для детектирования заряженной компоненты вторичных КЛ (электроны и позитроны с энергией $E > 200$ кэВ, протоны с $E > 5$ МэВ, мюоны с $E > 1,5$ МэВ), нейтронной компоненты, а также γ -излучения с $E > 20$ кэВ. Модули новых установок расположены в четырёх научных центрах северного и южного полушарий, в широком диапазоне жёсткости геомагнитного обрезания (R_c) от 2 до 14 ГВ.

Практическая и научная значимость

Научная значимость работы заключается в том, что данный аппаратно-программный комплекс предназначен для изучения физической природы периодических и спорадических вариаций вторичной компоненты КЛ. В том числе, появляется принципиальная возможность определения причин зарегистрированных изменений потоков КЛ и γ -квантов, сопровождающиеся вариациями атмосферного электрического поля, а также установить причинно-следственные связи между грозовой активностью в приземной атмосфере и световыми вспышками, γ -всплесками (т.н. TLE - и TGF-события), происходящими на высотах свыше 50-70 км.

Практическая значимость работы состоит в том, что данный аппаратно-программный комплект осуществляет оперативный контроль потоков заряженных частиц, γ -квантов и

радиоактивности (естественной и искусственной) в приземном слое атмосферы. Всесторонний анализ полученных новых экспериментальных данных позволит разработать методы прогноза сильных геомагнитных возмущений и землетрясений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана и введена в эксплуатацию новая международной сеть научных установок, которая в непрерывном режиме функционирует в разных частях мира: на Долгопрудненской научной станции (ДНС) ФИАН (Московская область, Долгопрудный, N55.56°, E37.3°; жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 2,12$ ГВ), в международном астрономическом комплексе CASLEO (Complejo Astronomico el Leoncito; Аргентина, S31.47°, W69.17°, высота 2550 м над уровнем моря, жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 9,8$ ГВ), в Евразийском национальном университете имени Л.Н. Гумилева (ЕНУ); Нур-Султан, Республика Казахстан, N51.10°, E71.26°; $R_c = 2,9$ ГВ) и в Национальном научном центре KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology; Саудовская Аравия, Эр-Рияд, N24.39°, E46.42°; $R_c = 14,4$ ГВ). Для измерения потоков вторичных КЛ и гамма-квантов в этих научных центрах разработаны три типа приборов:

- Установка «CARPET», чувствительная к заряженной компоненте КЛ;
- Установка «Нейтронный детектор» (НД), чувствительная к нейтронной компоненте КЛ;
- Установка «Гамма-спектрометр», чувствительная к γ -излучению.

2. Вывод о наличии корреляции измерений установок CARPET-МОСКВА и НД МОСКВА с данными московского нейтронного монитора. Для установки CARPET-МОСКВА коэффициент корреляции $R \approx 0,4$, для модулей установки НД МОСКВА $R \approx 0,4-0,5$;

3. Результаты проведённого сравнительного анализа данных установок CARPET и НД с Каталогом Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (ИЗМИРАН), свидетельствующие о том, что установки CARPET надёжно детектируют Форбуш-эффекты (ФЭ) с параметром «MagnM» $\geq 0,7$. Установки НД надёжно детектируют ФЭ с параметром «MagnM» $\geq 1,2$;

4. На примере анализа ряда ФЭ показана чувствительность установок к вариациям межпланетной и магнитосферной активности;

5. Результаты разработанной методики калибровки «Гамма-спектрометра» с использованием естественных фоновых источников γ -излучения и полученные калибровочные характеристики.

Достоверность

Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается корреляцией данных, полученных на независимых однотипных модулях установки. Достоверность данных установок CARPET и НД, в целом, подтверждена корреляцией с результатами долговременных измерений на нейтронных мониторах ($R \approx 0,4$, для модулей НД, $R \approx 0,4-0,5$ для модулей CARPET), а, также, корреляцией данных установок CARPET и НД с данными Каталога Форбуш-эффектов.

Апробация работы

Материалы диссертации многократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории физики Солнца и космических лучей им. акад. С. Н. Вернова (г. Долгопрудный).

По материалам работы представлены доклады на 14 научных конференциях: 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Россия, Дубна; 11 – 15 августа 2014); 40th COSPAR Scientific Assembly (Russia, Moscow; 2 – 10 August 2014); 24th European Cosmic Ray Symposium (Germany, Kiel, 1 – 5 September 2014); 34th International Cosmic Ray Conference (Netherlands, The Hague; 30 July – 6 August 2015); 34-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Россия, Дубна; 15 – 19 августа 2016); 25th European Cosmic Ray Symposium (Italy, Turino, 4-9 September 2016); 12-я ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Россия, Москва; 6 – 10 февраля 2017); 26th Extended European Cosmic Ray Symposium / 35th Russian Cosmic Ray Conference (Russia, Barnaul/Belokurikha; 6 – 10 July 2018); EGU General Assembly 2019 (Austria, Vienna; 7-12 April 2019); 36th International Cosmic Ray Conference (U.S.A., Madison, WI; 24 July – 1 August 2019); 62-я научная конференция МФТИ (Россия, Москва – Долгопрудный – Жуковский, 18-23 ноября 2019); 15-я ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Россия, Москва; 10 – 14 февраля 2020); 36-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Дистанционная; 28 сентября – 2 октября 2020); 16-я ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Россия, Москва; 8 – 12 февраля 2021).

Личный вклад автора

Представленные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично или при его прямом участии.

1. Автор лично разработал и изготовил следующие модули научной аппаратуры:
 - Интерфейсный блок, плату телеметрии и питания для детектора заряженных частиц CARPET [A6 - A8];
 - Интерфейсный блок, плату телеметрии и питания для научной аппаратуры «Нейтронный детектор» [A2, A4, A9];

2. Автор лично разработал внутрисхемное программное обеспечение для научной аппаратуры CARPET и «Нейтронный детектор»;
3. Автор лично разработал протоколы обмена данными с персональным компьютером для научной аппаратуры CARPET и «Нейтронный детектор»;
4. Автор произвёл установку и ввёл в эксплуатацию всю научную аппаратуру, представленную в данной работе;
5. Автор лично разработал и испытал программное обеспечение для обработки и анализа научной информации установок CARPET, «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр» [A9, A6 - A8, A11];
6. Автор произвёл первичную обработку экспериментальных данных, полученных на созданных установках CARPET и «Нейтронный детектор», «Гамма-спектрометр» [A6, A8, A9, A10, A11];
7. Автор определил величины барометрических коэффициентов для установок CARPET и «Нейтронный детектор» [A8, A9, A10];
8. Автор определил величину температурного коэффициента для установки CARPET-МОСКВА;
9. Автор лично разработал и испытал методику учёта аппаратурного температурного эффекта для установок «Гамма-спектрометр»;
10. Автор выполнил первичный анализ зарегистрированных Форбуш-понижений КЛ, провёл анализ суточной волны, годовой вариации космических лучей.

Публикации

Всего по теме диссертации опубликованы 30 работ, включая 15 тезисов докладов конференций. Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus и удовлетворяющих требованиям Высшей аттестационной комиссии (ВАК). Список публикаций приводится в конце автореферата.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 123 страницы, включая 79 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 121 наименование.

Краткое содержание работы

Во **введении** приведено обоснование актуальности диссертации, сформулированы цели и задачи работы, проанализирована научная новизна полученных результатов и их практическая значимость. Приведён список защищаемых положений, сведения об апробации работы и её достоверности, список публикаций автора и его личный вклад, описана структура диссертации.

В **первой главе** приведены современные представления о природе происхождения КЛ. Описаны методы регистрации заряженной компоненты КЛ, нейтронов и γ -квантов. В частности, газоразрядные Г-М счётчики, нейтронные счётчики (наполненных газом ^3He) и сцинтилляционные детекторы, на основе которых разработаны установки, описанные в последующих главах. Кроме того, приведены принципы работы и характеристики некоторых существующих уставок для регистрации КЛ.

Во **второй главе** приведены описание, характеристики и принципиальные электрические схемы новой установки для измерения потоков заряженной компоненты вторичных КЛ CARPET. На сегодняшний день существует сеть научных установок данного типа, состоящая из 5 модулей CARPET, расположенных в различных точках мира (Долгопрудный, Московская область; Нур-Султан, Республика Казахстан; Эр-Рияд, Саудовская Аравия). Детектирующими элементами установки CARPET являются газоразрядные счётчики СТС - 6, объединённые в 12 детектирующих блоков, по 10 счётчиков в каждом. Запись экспериментальных данных происходит со скважностью 1 мс по трём каналам: UP, LOW, TEL. Канал UP соответствует интегральному счёту заряженных частиц, проходящих через верхний слой из 60 счётчиков. Канал LOW соответствует счёту частиц, проходящих через нижний слой из 60 счётчиков. TEL – канал совпадений.

На основании данных о максимальной длительности единичного импульса счётчиков СТС-6 и среднего темпа счёта, для установок CARPET была определена вероятность объединения близлежащих по времени импульсов от различных счётчиков (включённых по «ИЛИ») в единый импульс (ошибки счёта). Условием появления ошибки принято наличие в детектирующем канале двух или более импульсов (x) за время, равное удвоенной длительности одного импульса ($\tau = 2\Delta t$). Вероятность возникновения данной ошибки пренебрежимо мала: $P(x \geq 2) \approx 0,0001$.

Рассмотрено влияние барометрического эффекта на темп счёта установок CARPET, который обусловлен поглощением КЛ слоем воздуха над прибором (рис. 1). Барометрический коэффициент β выражается из уравнения $\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_P \cong \beta \Delta P$ [12-15], где: N – темп счёта установки CARPET; N_0 – средний темп счёта установки CARPET; ΔP – абсолютное отклонение

атмосферного давления от средней величины. Для установки CARPET-МОСКВА: $\beta = -0,1864 \pm 0,0024\%/гПа$, $R^2 = 0,8975$. Для установки CARPET-ASTANA 0: $\beta = -0,1943 \pm 0,0026\%/гПа$, $R^2 = 0,8823$. Для установки CARPET-ASTANA 1: $\beta = -0,1885 \pm 0,0027\%/гПа$, $R^2 = 0,8707$.

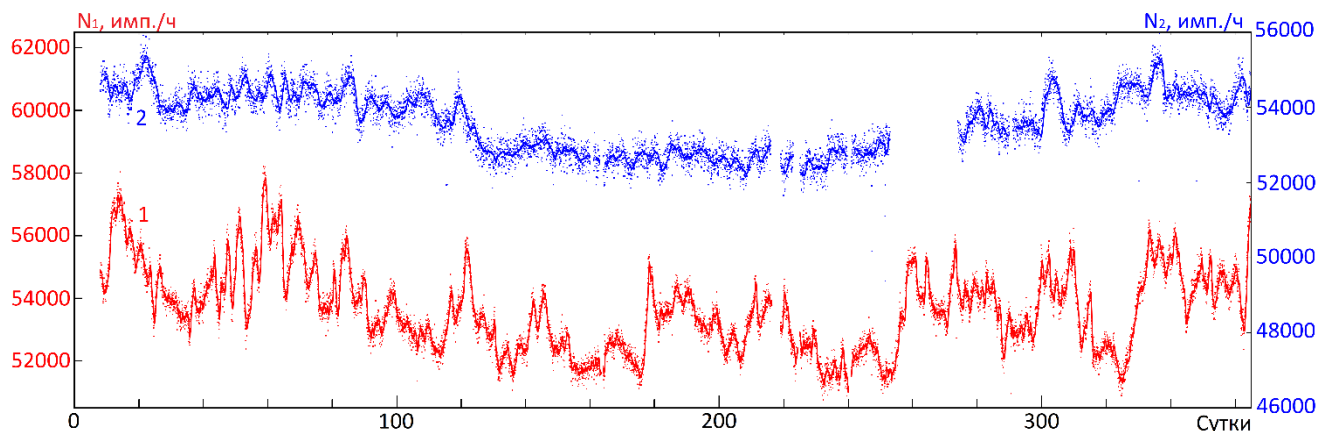


Рис. 1— Графики темпа счёта канала TEL установки CARPET-МОСКВА за 2019 год: 1 — исходные данные (N_1), 2 — данные с учётом барометрического эффекта (N_2).

Для оценки температурного эффекта были использованы данные канала TEL установки CARPET-МОСКВА за 2019 – 2020 гг. Высотные профили температуры и атмосферного давления были определены по экспериментальным данным Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО; Долгопрудный). Температурный эффект был определён двумя способами, в основе которых взяты метод эффективного уровня генерации мюонов и интегральный метод [16].

Метод эффективного уровня генерации основан на предположении, что мюоны, в основном, генерируются на определённом изобарическом уровне, который обычно принимается равным 100 гПа. Высота H данного уровня зависит от температурного режима атмосферы. Отклонение темпа счёта установки зависит от изменения высоты уровня генерации ΔH и изменения температуры этого слоя воздуха [16-18]: $\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T = \alpha_H \Delta H + \alpha_T \Delta T$, где $\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T$ — относительное отклонение темпа счёта установки CARPET; ΔH — абсолютное отклонение высоты эффективного уровня генерации от среднего; α_H — отрицательный температурный коэффициент (коэффициент распада); ΔT — абсолютное отклонение температуры слоя воздуха от среднего; α_T — положительный температурный коэффициент. Получены значения температурных коэффициентов: $\alpha_H = -4,00684 \pm 0,0652\%/км$, $R^2 = 0,8191$; $\alpha_T = 0,0080 \pm 0,0038\%/^{\circ}C$, $R^2 = 0,0049$.

Согласно интегральному методу определения температурного эффекта [16-19]: $\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T = \int_0^P \alpha(x) \Delta T(x) dx$, где P — атмосферное давление в точке наблюдения; $\alpha(x)$ — плотность температурного коэффициента; $\Delta T(x)$ — отклонение температуры от среднего значения в слое

воздуха, соответствующего атмосферному давлению от x до $x+dx$. В то же время, по данным измерений ЦАО имеются 16 изобарических поверхностей: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 и 10 гПа. Изобарическую поверхность 10 гПа было решено исключить из расчётов, так как за период времени 2019 – 2020 гг. имеется всего 148 измерений для данной величины атмосферного давления. Уравнение температурного эффекта было представлено в виде суммы по изобарическим поверхностям: $N_{i+1} = N_i(1 - \alpha_{i+1} \Delta T_{i+1})$, где α_{i+1} – температурный коэффициент для изобарической поверхности $i+1$; ΔT_{i+1} – отклонение температуры от среднего значения для изобарической поверхности $i+1$; N_i – темп счёта установки CARPET-МОСКВА, с введённой температурной поправкой по изобарической поверхности i ; N_{i+1} – темп счёта установки CARPET-МОСКВА, с введённой температурной поправкой по изобарической поверхности $i+1$.

Таблица 1 – Результаты определения температурного коэффициента интегральным методом.

P , гПа	\bar{T} , °C	σ_T , °C	α , %/°C	n
20	-57,13	11,30	-0,0909±0,0041	670
30	-59,00	9,04	-0,0193±0,0047	764
50	-59,09	7,45	-0,0078±0,0055	807
70	-58,30	6,46	0,0023±0,0015	826
100	-56,97	6,00	-0,0004±0,0067	859
150	-55,52	6,46	-0,0100±0,0068	849
200	-56,56	7,03	0,0094±0,0031	859
250	-54,03	5,57	-0,0580±0,0069	863
300	-47,63	5,91	-0,0657±0,0061	863
400	-33,62	7,11	-0,0366±0,0049	868
500	-22,22	7,45	-0,0078±0,0047	868
700	-6,79	7,30	-0,0071±0,0025	874
850	0,76	7,78	0,0086±0,0045	881
925	3,92	9,00	0,0161±0,0039	879
1000	2,62	8,71	0,0124±0,0098	170

Результаты приведены в таблице 1. Первый столбец – атмосферное давление для данной изобарической поверхности. Второй столбец – средняя температура для данной изобарической поверхности по данным за 2019-2020 гг. Третий столбец – среднеквадратичное отклонение

температуры. Четвертый столбец – температурный коэффициент для данной изобарической поверхности. Пятый столбец – число измерений на данной изобарической поверхности за период 2019-2020 гг. По данным за 2019 г. была установлена зависимость между исходными (без учёта метеорологических эффектов) данными установки CARPET-МОСКВА и данными московского нейтронного монитора (МНМ) [20]. Коэффициент корреляции: $R = 0,34$. После введения барометрической поправки в данные CARPET-МОСКВА: $R = 0,36$. После введения температурной поправки по методу эффективного уровня генерации: $R = 0,39$. После введения температурной поправки интегральным методом: $R = 0,2$. Интегральный метод определения температурного эффекта оказался неэффективным, что обусловлено нерегулярностью данных измерений ЦАО для больших высот.

Геометрический фактор установки CARPET был оценён косвенно, через известный геометрический фактор стандартного телескопа (состоящего из 2-х счётчиков СТС-6, а также, алюминиевого поглотителя), используемого в стратосферном эксперименте ДНС ФИАН [21]. Величина геометрического фактора G_{CARPET} установки CARPET-МОСКВА: $1311,13 \pm 54,31 \text{ см}^2\cdot\text{ср}$.

В **третьей главе** приведены описание, характеристики и принципиальные электрические схемы новой установки для измерения потоков нейтронной компоненты вторичных КЛ «Нейтронный детектор» (НД). На сегодняшний день существует сеть научных установок данного типа, состоящая из 6 модулей НД, расположенных в различных точках мира (Долгопрудный, Московская область; Нур-Султан, Республика Казахстан; Сан-Хуан (CASLEO), Аргентина). Детектирующий модуль состоит из 9 нейтронных счётчиков СНМ-18, наполненных ^3He . Для замедления нейтронов до тепловых энергий $E \approx 0,0025 \text{ эВ}$, счётчики помещаются между двумя слоями полиэтилена. Сигналы 9 счётчиков объединяются по «ИЛИ».

Аналогично установкам CARPET, для НД был произведён расчёт вероятности ошибки счёта. Вероятность возникновения данной ошибки также пренебрежимо мала: $P(x \geq 2) \approx 0,000004$.

Для установок НД был определён барометрический коэффициент β . Результаты приведены в таблице 2. На рис. 2 приведены графики данных установки НД 0 МОСКВА за 2019 г: 1 – темп счёта без учёта барометрического эффекта (исходные данные), 2 – темп счёта с учётом барометрического эффекта.

По данным измерений установок НД CASLEO за июль 2016 – ноябрь 2018 гг. было проведено исследование суточной волны потоков нейтронов. Исходные миллисекундные данные были проинтегрированы до часовых. Далее было произведено усреднение массивов суточных данных по соответствующим часам за указанный период времени (метод наложения эпох).

Таблица 2 – Результаты определения барометрического коэффициента для установок НД.

Модуль	β , %/гПа	R^2
НД 0 CASLEO	$-0,5609 \pm 0,010$	0,7978
НД 1 CASLEO	$-0,5813 \pm 0,009$	0,8341
НД 2 CASLEO	$-0,5629 \pm 0,010$	0,8178
НД 0 МОСКВА	$-0,5709 \pm 0,010$	0,9052
НД 1 МОСКВА	$-0,5526 \pm 0,006$	0,9352
НД 0 ASTANA	$-0,6232 \pm 0,011$	0,9063

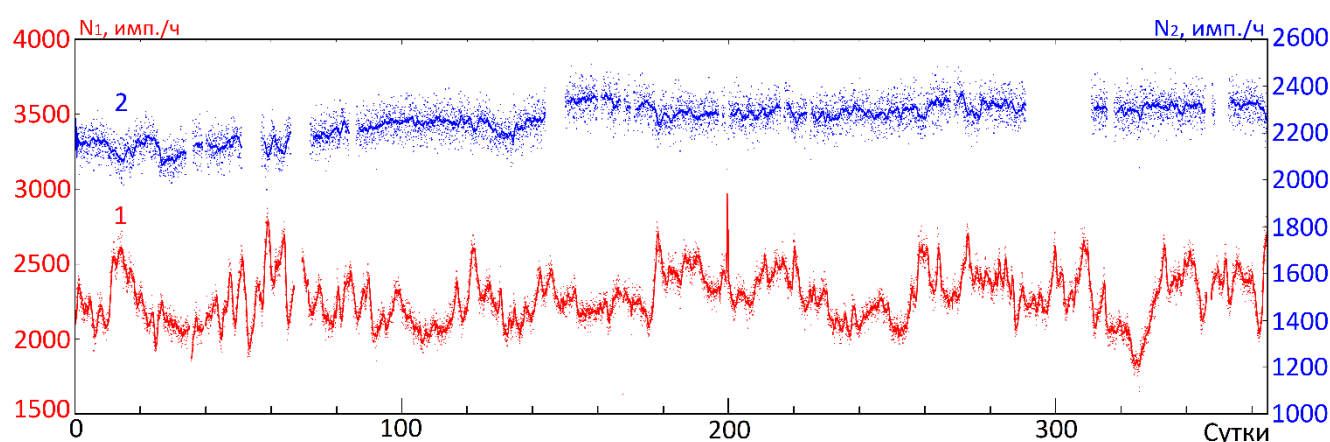


Рис. 2– Графики темпа счёта канала TEL установки НД 0 МОСКВА за 2019 год: 1 – исходные данные (N_1), 2 – данные с учётом барометрического эффекта (N_2).

На графике (рис. 3) присутствуют два максимума темпа счёта, приблизительно, в 8 и 20 часов по всемирному времени (UTC). Максимумам темпа счёта соответствуют минимумы атмосферного давления и наоборот, что подтверждает важность введения и корректность барометрической поправки.

Была исследована возможная температурная зависимость НД (аппаратурный эффект). Температурный коэффициент определён по формуле, аналогичной выражению для барометрического эффекта: $\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T = \alpha \Delta T$, где α – температурный коэффициент. Для модуля 0 НД CASLEO: $\alpha = -0,0017 \pm 0,0072\%/гПа$, $R^2 = 0,00008$; для модуля 1 НД CASLEO: $\alpha = 0,0079 \pm 0,0062\%/гПа$, $R^2 = 0,00217$; для модуля 2 НД CASLEO: $\alpha = -0,0259 \pm 0,0067\%/гПа$, $R^2 = 0,01969$. Зависимость $\Delta N/N_0$ от ΔT является несущественной и температурным эффектом для установок НД можно пренебречь. Остаточная волна на рис. 3 является следствием суточной анизотропии потоков КЛ.

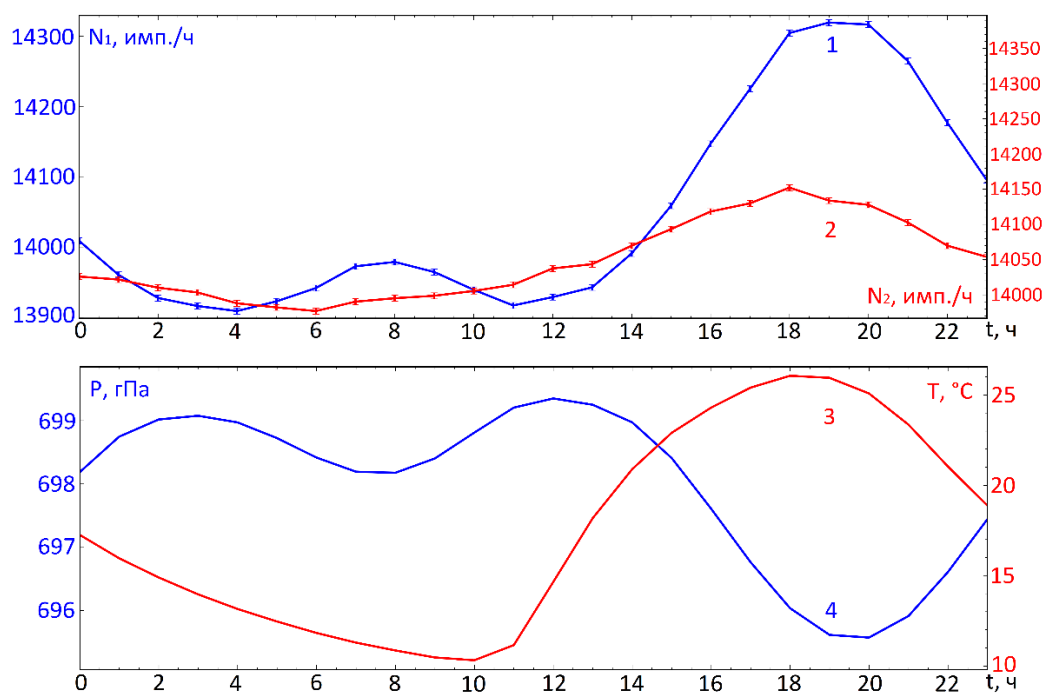


Рис. 3 – Суточные волны темпа счёта нейтронов, атмосферного давления и температуры, полученные методом наложения эпох в период с июля 2016 г. по ноябрь 2018 г. по данным модуля 0 НД CASLEO: 1 – данные, не учитывающие барометрический эффект (N_1), 2 – данные, учитывающие барометрический эффект (N_2), 3 – суточная волна температуры внутри корпуса прибора, 4 – суточная волна атмосферного давления.

По данным за 2019-2020 гг. была установлена зависимость между данными установок НД МОСКВА 0-1 (с учётом барометрического эффекта) и МНМ. Для модуля НД 0 МОСКВА: $R = 0,49$. Для модуля НД 1 МОСКВА: $R = 0,42$.

В **четвёртой главе** приведены описание, характеристики и принципиальные электрические схемы новой установки «Гамма-спектрометр», предназначенной для измерения γ -излучения, четыре детектирующих модуля которой установлены и запущены в 2015 г. в астрономическом комплексе CASLEO. Детектирующий модуль включает в себя сцинтилляционные сборки и электронные блоки. Сцинтилляционная сборка состоит из фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) Hamamatsu R1307 диаметром 76 мм и сцинтиллятора NaI(Tl) диаметра 76,2 мм и толщины 76,2 мм. Электронный блок детектирующего модуля состоит из высоковольтного преобразователя, делителя напряжения и предусилителя.

На рис. 4 показано влияние аппаратурного температурного эффекта на данные «Гамма-спектрометра»: приведены графики дифференциальных спектров для детектирующего модуля 0, полученные усреднением исходных спектров по каждому каналу по данным за месяц. Сплошная линия – спектр за январь 2020 г., пунктирная линия – спектр за июнь 2020 г. Январь был выбран

как тёплый месяц, а июнь является одним из самых холодных месяцев для данного региона. Из графиков виден сдвиг характерных пиков спектра, который увеличивается с ростом энергии (номера канала).

В связи с чем, была поставлена задача откалибровать «Гамма-спектрометр», с учётом выявленного аппаратурного температурного эффекта. В качестве калибровочных источников γ -излучения использованы изотопы: ^{40}K (1460 кэВ), ^{214}Bi (609 кэВ и 1760 кэВ), ^{208}Tl (908 кэВ и 2615 кэВ), которые являются радиоактивными элементами, содержащимися в атмосфере и почве [22]. На рис. 4 прямоугольными областями показаны окрестности спектральных линий и изотопы, соответствующие им. В энергетическом диапазоне $\sim 0 - 0,4$ МэВ преобладает комптоновское рассеяние γ -квантов, поэтому при калибровке он не учитывается. Энергетический пик, лежащий в диапазоне (65–70)-го номера каналов, возникает из-за процесса образования электрон-позитронных пар и также не учитывается [23].

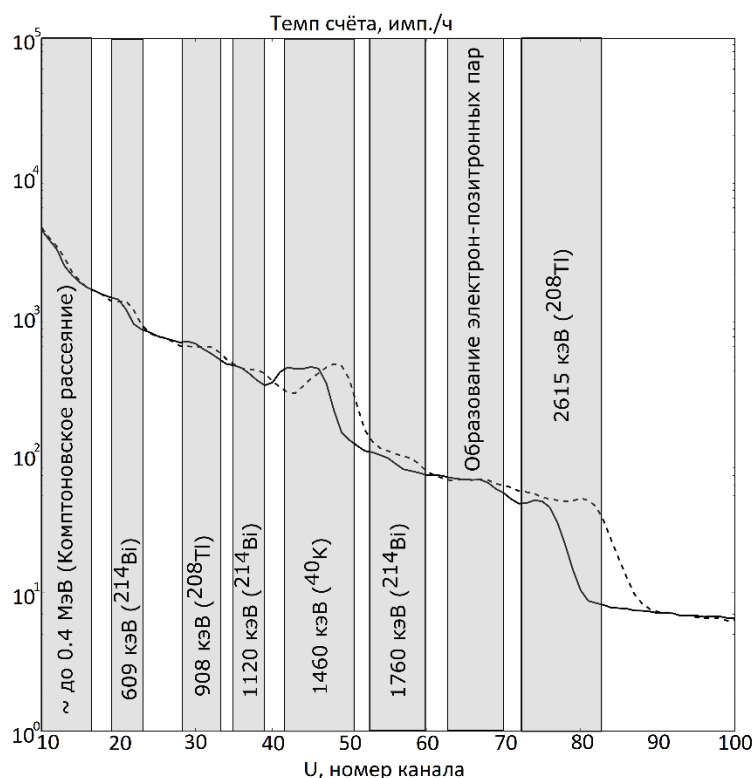


Рис. 4 – Графики дифференциального спектра модуля 0. Сплошной линией показан спектр по данным за январь 2020 г., пунктирной линией показан спектр за июнь 2020 г.

К энергиям известных шести спектральных линий добавлено начальное условие: $E(0) = 0$. В результате имеется 7 точек E_n : $E_0(U_0=0)$, $E_1(U_1)$, ..., $E_6(U_6)$, разделяющих спектральный диапазон детектирующего модуля на 6 интервалов, значения энергий внутри которых можно задать кусочно-линейной функцией: $E(U) = E_n + k_n(U - U_n)$, где $E(U)$ – значение энергии, соответствующее номеру канала U ; E_n – начальное значение энергии в данном интервале,

соответствующее номеру канала U_n ; k_n – угловой коэффициент текущей интерполяционной прямой: $k_n = \frac{E_{n+1}-E_n}{U_{n+1}-U_n}$, где E_{n+1} – конечное значение энергии в текущем интервале, соответствующее номеру канала U_{n+1} .

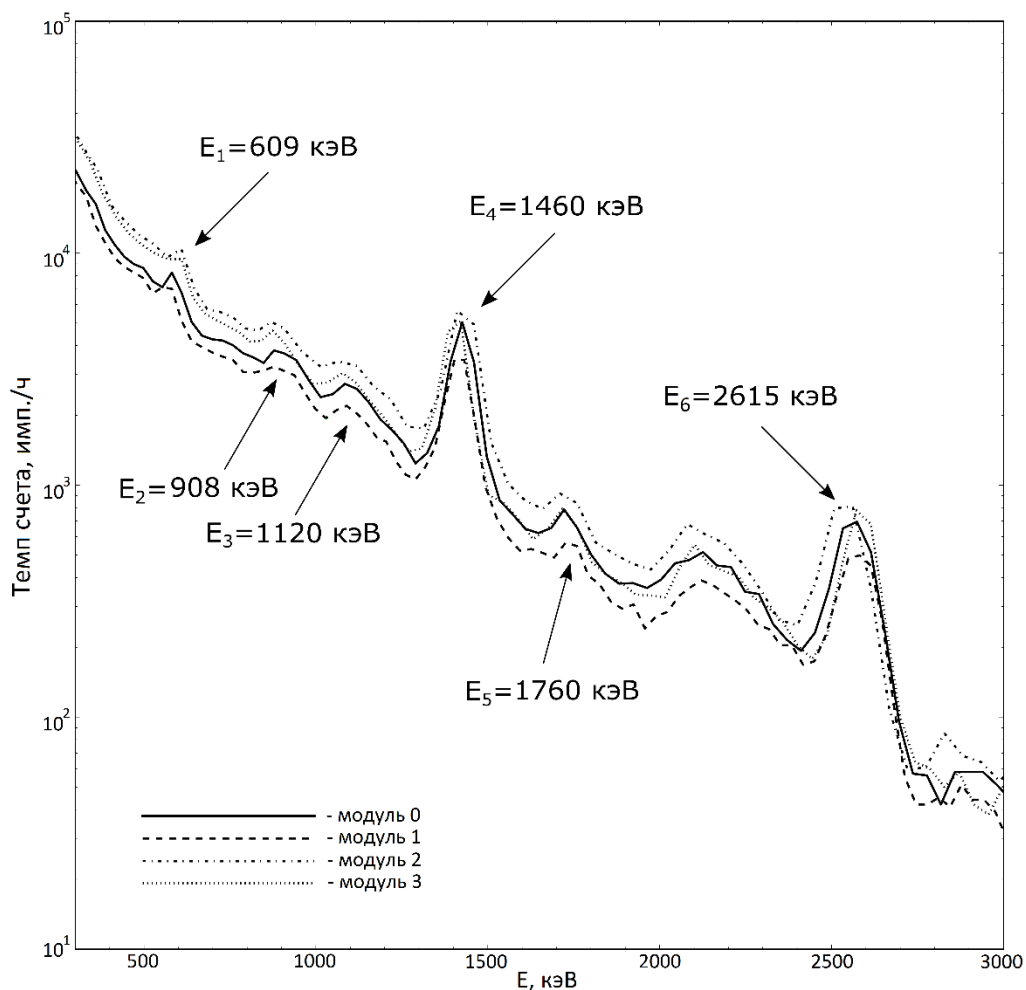


Рис. 5 – Дифференциальные спектры для 4-х детектирующих модулей по данным за 01.01.2017 с 00:00 до 01:00 часов UTC, полученные после пересчёта номеров каналов в энергию γ – квантов.

Результат калибровки по естественным источникам γ -излучения показан на рис. 5. Спектры 4-х детектирующих модулей приведены к согласию, как между собой, так и с данными по энергиям естественных источников γ -излучения.

В **пятой главе** приведены исследования чувствительности разработанных экспериментальных установок. Отдельно рассмотрены несколько событий, произошедших в 2016-2019 гг. Для сравнения приводятся данные нейтронных мониторов.

Для установок CARPET-МОСКВА и НД 0 МОСКВА был проведён сравнительный анализ данных на предмет совпадений с данными Каталога Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений [24] за 2019 г. Согласно каталогу, за этот период времени зафиксировано 124 Форбуш-эффекта.

По данным установки CARPET-МОСКВА (с учётом барометрического и температурного эффектов) было зарегистрировано 77 из 124 понижений. Из 47 необнаруженных событий, 15 событий попали во временные интервалы, когда установка была отключена. Среди оставшихся 32 событий, 2 имеют величину параметра «MagnM» равную 0,6. Остальные события имеют величину $\leq 0,5$. Таким образом, для надёжной регистрации на установках CARPET, величина «MagnM» должна быть $\geq 0,7$.

По данным установки НД 0 МОСКВА (с учётом барометрического эффекта) было зарегистрировано 46 из 124 понижений. Из 78 необнаруженных событий, 22 событий попали во временные интервалы, когда установка была отключена. Среди оставшихся 56 событий, 2 имеют величину параметра «MagnM» равную 1,1. Таким образом, для надёжной регистрации на установках НД, величина «MagnM» должна быть $\geq 1,2$.

Был проведён анализ Форбуш-эффекта, зарегистрированного в июле 2017 г. В активной области NOAA2665 (S06, W29) на Солнце 14-17 июля 2017 г. произошла серия вспышек. Наиболее мощная вспышка (M2.4), обнаружена 14 июля в ~2:00 UTC. В ~3:00 UTC зарегистрировано увеличение потоков солнечных протонов (<100 МэВ) по данным измерений на космическом аппарате GOES-13 [25]. Скорость солнечного ветра достигла к 17 июля 625 км/с. Примерно в 6:00 UTC началось геомагнитное возмущение [26]. По данным установки CARPET-ASTANA 16 июля зарегистрировано понижение потоков КЛ, примерно, на 1,7% и 1,4% (модули 0 и 1) от среднего темпа счёта. На трёх модулях высокогорного НД CASLEO также зарегистрировано понижение потоков КЛ, с амплитудой, примерно 12%. Данные результаты согласуются с измерениями на наземных нейтронных мониторах. Для сравнения приведены данные темпа счёта за аналогичный период времени для нейтронных мониторов: Юнгфрауйох (Jungfraujoch IGY; $R_c = 4,49$ ГВ), Алматы ($R_c = 6,69$ ГВ) и Апатиты ($R_c = 0,65$ ГВ). Амплитуда понижения темпа счёта нейтронных мониторов для данного события: 3,8%, 3,1% и 4,4% соответственно.

В сентябре 2017 г. произошло аналогичное событие, связанное с Форбуш-эффектом, который был вызван солнечной вспышечной активностью в области NOAA 12673 (S11, W16) с 4 сентября по 10 сентября. Солнечные вспышки сопровождались потоками высокоскоростного солнечного ветра и увеличенного межпланетного магнитного поля на орбите Земли. В земной магнитосфере наблюдалось геомагнитное возмущение с 7 по 8 сентября.

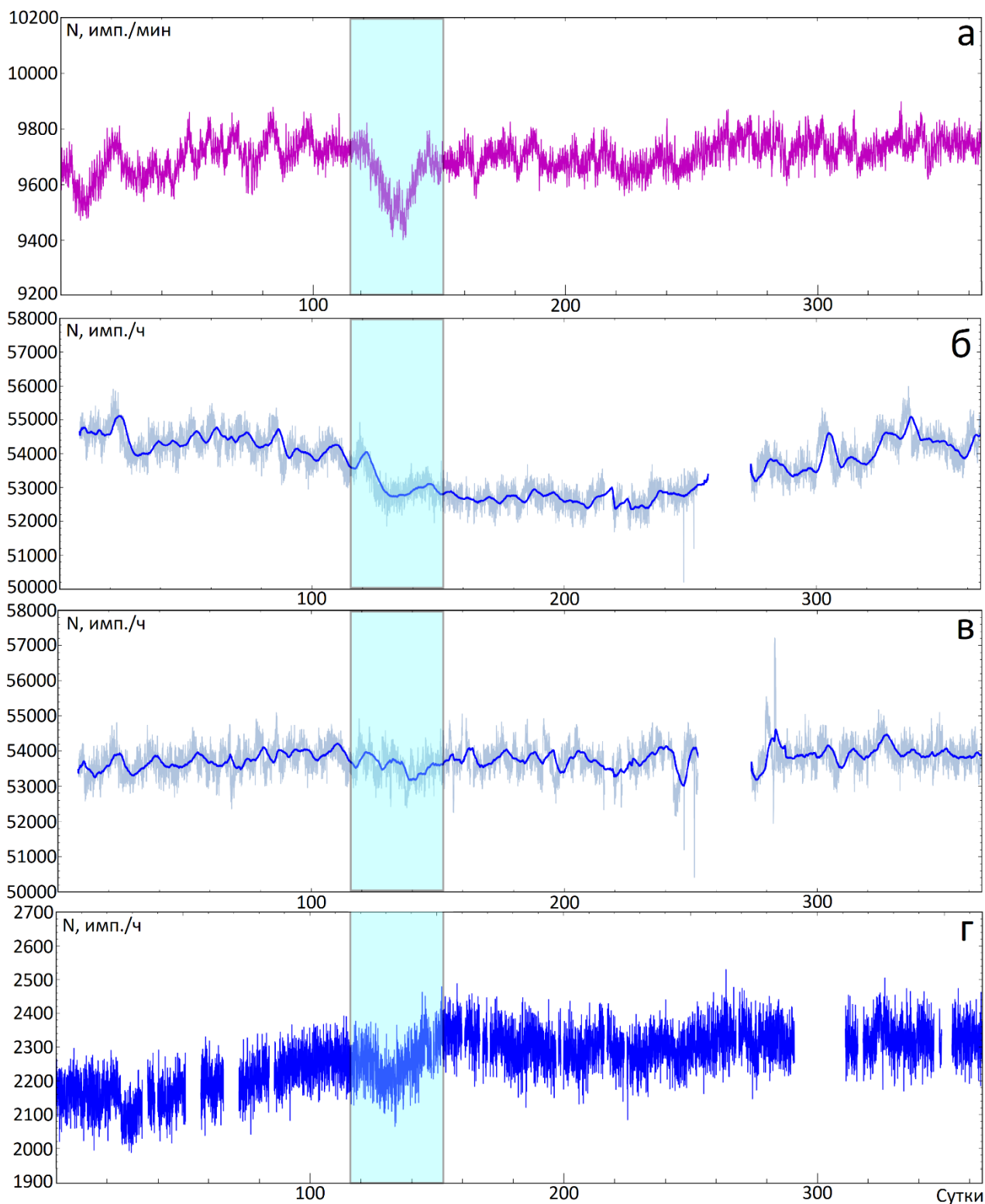


Рис. 6 – Вариации потоков КЛ за 2019 г: (а) московский нейтронный монитор, (б) CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта), (в) CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического и температурного эффектов), (г) НД 0 МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта).

Также значение планетарного Kp -индекса находилось на уровне 8-9, а величина Dst -индекса уменьшилась до -142 нТл [26]. 8 сентября по данным 2-х модулей установки CARPET-

ASTANA зарегистрировано понижение потоков КЛ, примерно, на 2,0% и 2,3% (для модулей 0 и 1) от среднего темпа счёта. Данные результаты также согласуются с измерениями на наземных нейтронных мониторах: Юнгфрауйох, Алматы и Апатиты. Амплитуда понижения темпа счёта нейтронных мониторов для данного события: 3,8%, 3,7% и 4,8% соответственно.

В апреле-мае 2019 г произошло существенное Форбуш-понижение. На рис. 6 а приведён график темпа счёта МНМ (данных с учётом барометрического эффекта) за 2019 г. Форбуш-эффект выделен на графике прямоугольной областью. Понижение также наблюдается на установках CARPET-МОСКВА (рис. 6 б-6 в) и НД 0 МОСКВА (рис. 6 г). В данный период (примерно, с 28 апреля по 18 мая 2019) года наблюдалась серия незначительных Форбуш-эффектов. Регулярные события на Солнце препятствовали восстановлению потоков КЛ. После 13-го мая активность на Солнце снизилась и потоки КЛ начали постепенно восстанавливаться с 18 мая [27].

Также были представлены экспериментальные данные, полученные в астрономическом комплексе CASLEO в январе 2016 года во время грозовой активности. Для измерений вариаций электрического поля используется электростатический флюксметр EFM-100 (Voltek, США), установленный в непосредственной близости от детекторов КЛ.

В таблице 3 приведены события января 2016 г., во время которых были зарегистрированы возрастания темпа счёта заряженной компоненты КЛ и γ -излучения. В первой колонке указана дата события. Во второй колонке – интервал времени (UTC). В третьей колонке приводятся амплитуды возрастаний (%) темпа счёта в канале UP модуля CARPET-CASLEO. В четвёртой колонке приводятся амплитуды возрастаний (%) темпа счёта модуля 0 «Гамма-спектрометра» ($E > 100$ кэВ). В пятой колонке приводятся амплитуды возрастаний (%) темпа счёта модуля 0 НД. В шестой колонке приводятся вариации (ΔE , кВ/м) электрического поля относительно невозмущенного уровня.

Основные характеристики зарегистрированных событий:

1. Длительность возрастаний темпа счёта заряженной компоненты КЛ и γ -излучения на установках CARPET-CASLEO и «Гамма-спектрометр» составляла до нескольких часов. Возрастаний на НД зафиксировано не было.
2. Амплитуды возрастаний темпа счёта установок CARPET-CASLEO и «Гамма-спектрометр» не превышали 30% относительно фонового уровня. При этом, наблюдались кратковременные вариации напряженности электрического поля в диапазоне от -15 кВ/м до +17 кВ/м.

Таблица 3 – События в январе 2016 г в CASLEO, характеризующиеся возрастаниями потоков вторичных КЛ на установках CARPET-CASLEO и «Гамма-спектрометр» во время грозовой активности.

Дата	Время, UTC	CARPET, %,	«Гамма-спектрометр», %	НД, %	ΔE , кВ/м
5.01.2016	~14-19	11	22	-	-10 ÷ +13
	~21-22	10	8	-	-12 ÷ +2
7.01.2016	~8-10	6	5	-	-8 ÷ +4
	~18-20	5	7	-	-4 ÷ +3
8.01.2016	~7-8	-	2	-	0 ÷ +0.04
	~10-12	-	3	-	0 ÷ +0.04
20.01.2016	~18-20	2	5	-	-1 ÷ +4.5
	~20-22	6	9	-	-7 ÷ +8.5
	~23-24	2	2	-	-2 ÷ +2
23.01.2016	~1-3	2	3	-	-11 ÷ +4
	~4-6	3	1	-	-7 ÷ +9
	~6,5-14	4-6	9	-	-7 ÷ +2
	~22-24	4	9	-	-7 ÷ +5
24.01.2016	~1-2	4	7	-	-9 ÷ +15
	~3-4	2	1	-	-5 ÷ +3
31.01.2016	~21-04	21	28	-17	-15 ÷ +17
-					-12 ÷ +2
1.02.2016					

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработаны 3 типа новых установок для регистрации вторичных КЛ: «CARPET», «Нейтронный детектор» (НД) и «Гамма-спектрометр». При разработке данных установок за основу была взята концепция модульности: несколько идентичных независимых установленных рядом модулей позволяют проводить взаимные калибровки, повышается надёжность, задача масштабируемости решается путём добавления нового модуля.

- Установка CARPET предназначена для детектирования заряженной компоненты вторичных космических лучей. В качестве детектирующих элементов в которой применены газоразрядные счётчики СТС-6. Установка CARPET регистрирует частицы следующих энергий: в каналах UP и LOW: электроны и позитроны с энергией $E > 200$ кэВ, протоны с $E > 5$ МэВ, мюоны с $E > 1,5$ МэВ, фотоны (эффективность $< 1\%$) с $E > 20$ кэВ. В канале совпадений TEL регистрируются более энергичные частицы: электроны с энергиями $E > 5$ МэВ, протоны с $E > 30$ МэВ и мюоны с $E > 15,5$ МэВ. Помимо информации о потоках космических лучей, данная установка производит измерения метеорологической информации (температуры и давления) и служебной информации (питающие напряжения). Совокупность этих данных называется «телеметрия». Данные и телеметрия от одного

модуля CARPET передаются на ПК по двум независимым интерфейсам RS-232. На сегодняшний день существуют 5 модулей CARPET данного типа: два модуля установлены в KACST (Эр-Рияд, Саудовская Аравия), два модуля установлены в ЕНУ им. Гумилёва (Нур-Султан, Республика Казахстан), один модуль установлен на ДНС ФИАН (Долгопрудный, Московская область).

- Установка «Нейтронный детектор», предназначена для детектирования нейтронной компоненты вторичных космических лучей. В качестве детектирующего элемента использованы гелиевые счётчики СМ-18, установленные между двумя слоями полиэтиленового замедлителя. Данная установка также производит измерения метеорологической информации и служебной информации. Аналогично CARPET, данные и телеметрия передаются на ПК по двум независимым интерфейсам RS-232. На сегодняшний день существуют 6 модулей «Нейтронный детектор»: три модуля установлены в CASLEO (Сан-Хуан, Аргентина), два модуля установлены на ДНС ФИАН (Московская область, Долгопрудный), один модуль установлен в ЕНУ им. Гумилёва (Нур-Султан, Республика Казахстан).

- Установка «Гамма-спектрометр», предназначена для детектирования γ -излучения с энергиями $E \leq 5$ МэВ. В качестве детектора использован сцинтиллятор NaI(Tl) диаметром 76,2 мм и толщиной 76,2 мм и фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R1307 диаметром 76 мм. Сигналы от детектирующих модулей подаются на АЦП USB3000. Передача данных АЦП на ПК осуществляется по интерфейсу USB. Разрешающая способность $\Delta E/E$ «Гамма-спектрометра» по ширине пика изотопа ^{40}K на его полувысоте $\cong 13,7$ %. На сегодняшний день существуют 4 модуля установки «Гамма-спектрометр», установленные в CASLEO (Сан-Хуан, Аргентина).

2. Для установок «CARPET», «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр» было разработано программное обеспечение, основными функциями которого являются: запись, визуализация и первичная обработка данных на ПК.

3. Разработан пакет программ для обработки экспериментальных данных установок «CARPET», «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр».

4. Для установок «CARPET» и «Нейтронный детектор» определён барометрический коэффициент.

5. Для модуля CARPET-МОСКВА, с помощью данных высотного зондирования ЦАО (Долгопрудный, Московская область) был определён температурный коэффициент по методу эффективного уровня генерации и интегральным методом.

6. Проведена оценка геометрического фактора установки CARPET-МОСКВА.

7. Разработана методика калибровки «Гамма-спектрометра» по спектральным линиям природных источников γ -излучения.

8. На примере установок CARPET-МОСКВА и НД 0 МОСКВА по данным за 2019-2020 гг. показано наличие корреляции с данными московского нейтронного монитора. $R \approx 0,4$ для НД, $R \approx 0,4-0,5$ для CARPET.

9. При сравнении данных за 2019 г. установок CARPET и НД с Каталогом Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений выявлено, что установки CARPET надёжно детектируют Форбуш-эффекты (ФЭ) для событий, параметр «MagnM» которых $\geq 0,7$. Установки НД надёжно детектируют ФЭ с параметром «MagnM» $\geq 1,2$.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, М. В. Филиппов. Анализ возрастаний космических лучей, зарегистрированных в октябре – ноябре 2013 г. Изв. РАН, сер. физ., 2015, том 79, № 5, с. 626–628. DOI: 10.7868/S0367676515050312 [V. S. Makhmutov, G. A. Bazilevskaya, Y. I. Stozhkov, J.-P. Raulin, M. V. Philippov. Analysis of Cosmic Ray Variations Recorded in October–December 2013. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2015, Vol. 79, No. 5, pp. 624–626. DOI: 10.3103/S1062873815050299]
- A2. М. В. Филиппов, Ю. И. Стожков, В. С. Махмутов, О. С. Максумов, С. В. Викторов, А. Н. Квашнин, А. А. Квашнин. Разработка компактного наземного нейтронного детектора. Изв. РАН, сер. физ., 2015, том 79, № 5, с. 763–766. DOI: 10.7868/S036767651505021X [M.V. Filippov, Yu.I. Stozhkov, V.S. Makhmutov, O.S. Maksumov, S.V. Viktorov, A.N. Kvashnin, A.A. Kvashnin. Developing a Compact Ground-Based Neutron Detector. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2015, Vol. 79, No. 5, pp. 753–756. DOI: 10.3103/S1062873815050202]
- A3. В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, М. В. Филиппов, Г. А. Базилевская, А. Н. Квашнин, Ж. Такза, А. Марун, Г. Фернандес, С. В. Викторов, В. М. Панов. Вариации космических лучей и приземного электрического поля в январе 2016 г. Изв. РАН, сер. физ., 2017, том 81, № 2, с. 262–265. DOI: 10.7868/S0367676517020260 [V.S. Makhmutov, Y.I. Stozhkov, J.-P. Raulin, M.V. Philippov, G.A. Bazilevskaya, A.N. Kvashnin, J. Tacza, A. Marun, G. Fernandez, S.V. Viktorov V.M. Panov. Variations in cosmic rays and the surface electric field in January 2016. Bulletin of the Russian Academy

- of Sciences: Physics, 2017, Vol. 81, No. 2, pp. 241–244. DOI: 10.3103/S1062873817020265]
- A4. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, Е. В. Калинин. Исследование вариаций потоков нейтронов с помощью наземного нейтронного детектора. Изв. РАН, сер. физ., 2019, том 83, № 5, с. 670–672. DOI: 10.1134/S0367676519050132
[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Y. I. Stozhkov, J.-P. Raulin, E. V. Kalinin. Studying variations in neutron fluxes with a ground-based neutron detector. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2019, Vol. 83, No. 5, pp. 611–613. DOI: 10.3103/S1062873819050137]
- A5. В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская, Ю. И. Стожков, М. В. Филиппов, Е. В. Калинин, А. К. Морзабаев, В. А. Ерхов, Ш. Гиниятова. Солнечная активность и вариации космических лучей в сентябре 2017 г. Изв. РАН, сер. физ., 2019, том 83, № 5, с. 602–605. DOI: 10.1134/S0367676519050223
[V. S. Makhmutov, G. A. Bazilevskaya, Y. I. Stozhkov, M. V. Philippov, E. V. Kalinin, A. K. Morzabaev, V. A. Erkhov, S. Giniyatova. Solar activity and cosmic ray variations in September 2017. Bulletin of the Russian academy of sciences: physics, 2019, Vol. 83, No. 5, pp. 543–546. DOI: 10.3103/S1062873819050228]
- A6. M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, O. S. Maksumov, G. A. Bazilevskaya, A. K. Morzabaev, Ye. A. Tulekov. Characteristics of the ground-based «CARPET-ASTANA» instrument for detecting charged component of cosmic rays and preliminary analysis of the first experimental data. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, Vol. 959, 163567. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163567
- A7. A. Maghrabi, V.S. Makhmutov, M. Almutairi, A. Aldosari, M. Altilasi, M.V. Philippov, E.V. Kalinin. Cosmic ray observations by CARPET detector installed in central Saudi Arabia-preliminary results. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, Vol. 200, 105194. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105194
- A8. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, О. С. Максумов. Наземная установка для детектирования заряженной компоненты космических лучей CARPET. Приборы и техника эксперимента, 2020, № 3, с. 109–117. DOI: 10.31857/S0032816220030039
[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, and O. S. Maksumov. The CARPET Ground Facility for Detecting the Charged Component of Cosmic Rays. Instrum Exp Tech., 2020, Vol. 63, № 3, pp. 388–395. DOI: 10.1134/S0020441220030033]

- A9. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, О. С. Максумов, J.-P. Raulin, J. Tacza. Наземная установка для детектирования нейтральной компоненты космических лучей “Нейтронный детектор”. Приборы и техника эксперимента, 2020, № 5, с. 96–103. DOI: 10.31857/S0032816220050298
[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, and O. S. Maksumov. A Neutron Detector Ground-Based Facility for Detecting the Neutral Component of Cosmic Rays. Instrum Exp Tech., 2020, Vol. 63, № 5, pp. 716–723. DOI: 10.1134/S0020441220050292]
- A10. Е. А. Тулеков, В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская, Ю. И. Стожков, А. К. Морзабаев, М. В. Филиппов, В. И. Ерхов, А. С. Дюсембекова. Наземная установка для изучения вариаций космических лучей в городе Нур-Султан. Геомagnetизм и аэрoномия, 2020, том 60, № 6, с. 704–709. DOI: 10.31857/S0016794020060139
[E. A. Tulekov, V. S. Makhmutov, G. A. Bazilevskaya, Yu. I. Stozhkov, A. K. Morzabaev, M. V. Philippov, V. I. Erkhov, and A. S. Dyusembekova. Ground-based Instrument for the Study of Cosmic Ray Variation in Nur-Sultan. Geomagnetism and Aeronomy, 2020, Vol. 60, No. 6, pp. 693–698. DOI: 10.1134/S0016793220060134]
- A11. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, А. Н. Квашнин, О. С. Максумов, Ю. И. Стожков, J.-P. Raulin, J. Tacza. Наземная установка для детектирования космических лучей “Гамма-спектрометр” в астрономическом комплексе CASLEO. Приборы и техника эксперимента, 2021, № 4, с. 74-78, DOI: 10.31857/S0032816221040030
[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, A.N. Kvashnin, O. S. Maksumov, Yu. I. Stozhkov, J.-P. Raulin, and J. Tacza. A Gamma-Spectrometer Ground Installation for Detecting Cosmic Rays in the Casleo Astronomic Complex. Instrum Exp Tech., 2021, Vol. 64, № 4, pp. 566–569. DOI: 10.1134/S0020441221040035]

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

- Б1. В.С. Махмутов, Г.А. Базилевская, Ж.-П. Ролан, М.В. Филиппов, Ю.И. Стожков. Анализ возрастных космических лучей, зарегистрированных в октябре-ноябре 2013 г. // Сборник трудов 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Дубна 2014, с. 10
- Б2. М.В. Филиппов, А.А. Квашнин, А.Н. Квашнин, В.С. Махмутов, О.С. Максумов, С.В. Викторов, Ю.И. Стожков. Разработка компактного наземного нейтронного детектора // Сборник трудов 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Дубна 2014, с. 76

- Б3. M. Philippov, Yu. Stozhkov, A. N. Kvashnin, O. Maksumov, A. A. Kvashnin, S. Viktorov, V. Makhmutov. Ground level neutron monitoring instruments // Book of abstracts, 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow 2014, p. 104
- Б4. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, J. Raulin, M. Philippov. Analysis of the cosmic ray variations and solar activity in October-November 2013 // Book of abstracts, 24th European Cosmic Ray Symposium, Kiel 2014, p. 35
- Б5. M. Philippov, O. Maksumov, S. Viktorov, Yu. Stozhkov, A. N. Kvashnin, A. A. Kvashnin, V. Makhmutov. Development of the ground-based compact neutron detector 2013 // Book of abstracts, 24th European Cosmic Ray Symposium, Kiel 2014, p. 77
- Б6. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, J. Raulin, A. Marun. Low-latitude cosmic ray increase during solar energetic particle events on 5-6 December 2006 // Book of abstracts, 25th European Cosmic Ray Symposium, Torino 2016, p. 51
- Б7. В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, Г. А. Базилевская, М. В. Филиппов, Ж. Такза, А. Марун, Г. Фернандес. Вариации заряженной и нейтральной Компонент космических лучей в приземной атмосфере // Сборник трудов 12-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2017, с. 179
- Б8. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, E. Kalinin, A. Morzabaev, V. Erkhov, Sh. Giniyatova. Solar activity and cosmic ray variations in September, 2017 // Book of abstracts, 25th Extended European Cosmic Ray Symposium / 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul/Belokurikha 2018, p. 41
- Б9. M. Philippov, V. Makhmutov, Yu. Stozhkov, J.-P. Raulin. Study of neutron flux variations using new ground-based neutron detector // Book of abstracts, 25th Extended European Cosmic Ray Symposium / 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul/Belokurikha 2018, p. 198
- Б10. V. S. Makhmutov, J.-P. Raulin, M. V. Philippov, S. Szpigel, Yu. I. Stozhkov, G. A. Bazilevskaya, G. Guimarães, J. Tacza, A. Kvashnin, E. V. Kalinin. Charge particle and neutral cosmic ray component variations during the surface electric field disturbances connected with thunderclouds as observed at CASLEO in 2016-2017 // Book of abstracts, EGU General Assembly 2019, Vol. 21, EGU2019-4513
- Б11. Э. О. Чиглинцев, М. В. Филиппов. Проектирование, разработка и применение прибора для измерения электрического поля Земли // Сборник трудов 62-й научной конференции МФТИ (фундаментальная и прикладная физика), Москва – Долгопрудный – Жуковский 2019, с. 272
- Б12. Е. А. Тулеков, А. К. Морзабаев, В. С. Махмутов, М. В. Филиппов. Изучение вариаций космических лучей на наземных установках города Нур-Султан, Казахстан // Сборник

трудов 15-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2020, с. 147

- Б13. А.А. Орлов, В.С. Махмутов, М.В. Филиппов, Ж.-П. Ролан. Вариации заряженной и нейтральной компонент космических лучей в сейсмической зоне CASLEO // Сборник трудов 36-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Москва 2020, с. 65
- Б14. А.А. Орлов, В.С. Махмутов, М.В. Филиппов, Ю.И. Стожков, Ж.-П. Ролан. Результаты исследований вариаций электрического поля и вторичных компонент космических лучей в сейсмоактивной зоне // Сборник трудов 16-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2021, с. 211
- Б15. Е.А. Тулеков, А.К. Морзабаев, В.С. Махмутов, В.И. Ерхов, М.В. Филиппов. Вариации космических лучей в период 2019-2020 гг. по данным наблюдений экспериментального комплекса ЕНУ, Казахстан // Сборник трудов 16-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2021, с. 159

Прочие публикации по теме диссертации:

- В1. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, J.-P. Raulin, A. Morzabaev, Sh. Giniyatova. Unusual cosmic ray increases observed during several solar flares in 2011-2013. Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2015), 2016, Vol. 236, 65. DOI: 10.22323/1.236.0065
- В2. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, Y. Yair, R. Yaniv, G. Harrison, K. Nicoll, K. Aplin. Cosmic ray measurements in the atmosphere at several latitudes in October, 2014. Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2015), 2016, Vol. 236, 392. DOI: 10.22323/1.236.0392
- В3. A. Maghrabi, V. Makhmutov, A. Aldosari, M. Almutairi, M. Altilasi, M. Philippov, E. Kalinin, A. Alshehri, R. Alfadhel, B. Almshari, J. Alrashied, E. Almutairi, B. Alrashide. Preliminary Results from CARPET charge particles detector located in high cut off rigidity. Proceedings of The 36th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2019), 2019, Vol. 358, p. 1115. DOI: 10.22323/1.358.1115
- В4. Е. А. Тулеков, А. К. Морзабаев, В. С. Махмутов, В. И. Ерхов, М. В. Филиппов. Вариации космических лучей в период 2016-2019 гг. по данным наблюдений экспериментального комплекса ЕНУ. Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилёва. Физика. Астрономия, 2020, том 133, № 4, с. 79-85. DOI: 10.32523/2616-6836-2020-133-4-79-85 [Ye. Tulekov, A. K. Morzabaev, V. S. Makhmutov, V. I. Yerkhov, M. V. Philippov. Variations of cosmic rays in the period 2016-2019 according to observations of the ENU

Список литературы

1. Дорман Л.И., Фейнберг Е.Л. Вариации космических лучей. УФН, 1956, т. 59, 189-228.
2. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: Уч. пособие для вузов. М.: Логос, 2007.
3. Chilingarian A., Karapetyan T., Melkumyan L. Statistical analysis of the Thunderstorm Ground Enhancements (TGEs) detected on Mt. Aragats. *Advances in Space Research*, 2013, Vol. 52, № 6, pp. 1178-1192, DOI: 10.1016/j.asr.2013.06.004.
4. Chilingarian A., Mailyan B. Recovering of the TGE electron and gamma ray energy spectra. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, Vol. 409, 012214, DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012214.
5. Chilingarian A., Khanikyants Y., Rakov V.A., Soghomonyan S. Termination of thunderstorm-related bursts of energetic radiation and particles by inverted intracloud and hybrid lightning discharges. *Atmospheric Research*, 2020, Vol. 233, 104713, DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104713.
6. Torii, T., Sugita, T., Kamogawa, M., Watanabe, Y., Kusunoki, K. Migrating source of energetic radiation generated by thunderstorm activity, *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38, L24801, DOI:10.1029/2011GL049731.
7. Chubenko, A.P., Antonova V.P., Kryukov S.Y., Piscal V.V., Ptitsyn M.O., Shepetov A. L., Vildanova L. I., Zybin K. P., Gurevich A.V. Intensive X- ray emission bursts during thunderstorms, *Phys. Lett. A*, 2000, 275, pp. 90–100, DOI: 10.1016/S0375-9601(00)00502-8.
8. Gurevich A.V., Chubenko A.P., Karashtin A.N., Mitko G.G., Naumov A.S., Ptitsyn M.O., Ryabov V.A., Shepetov A.L., Shlyugaev Yu.V., Vildanova L.I., Zybin K.P., Gamma- ray emission from thunderstorm discharges, *Phys. Lett. A*, 2011, 375, 1619–1625, DOI: 10.1016/j.physleta.2011.03.005.
9. Shepetov A., Antonova V., Kalikulov O., Kryakunova O., Karashtin A., Lutsenko V., Mamina S., Mukashev K., Piscal V., Ptitsyn M., Ryabov V., Sadykov T., Saduev N., Salikhov N., Shlyugaev Yu., Vildanova L., Zhukov V., Gurevich A. The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan, *Atmospheric Research*, 2020, Vol. 248, 105266, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105266.
10. Wada Y., Enoto T., Nakamura Y., Morimoto T., Sato M., Ushio T., Nakazawa K., Yuasa T., Yonetoku D., Sawano T., Kamogawa M., Sakai H., Furuta Y., Makishima K., Tsuchiya H.

- High peak- current lightning discharges associated with downward terrestrial gamma- ray flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, Vol. 125, № 4, DOI: 10.1029/2019JD031730.
11. Kelley N., Smith D., Dwyer J., Splitt M., Lazarus, S., Martinez-McKinney F., Hazelton B., Grefenstette B. Lowell A., Rassoul H. K. Relativistic electron avalanches as a thunderstorm discharge competing with lightning, *Nat. Commun.*, 2015, Vol. 6, 7845, DOI: /10.1038/ncomms8845.
 12. De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Echer E., Makhmutov V.S., Fernandez G. Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, Vol. 409, 01218.
 13. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. — 211 с.
 14. Dorman, L.I. *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 2004. - 855 p.
 15. Riadigos I., Garcia-Castro D., Gonzalez-Diaz D., Perez-Munuzuri. Atmospheric temperature effect in secondary cosmic rays observed with a 2 m² ground-based tRPC detector. *Earth and Space Science*, Vol. 7, e2020EA001131, DOI: 10.1029/2020EA001131.
 16. Zazyan M., Ganeva M., Berkova M., Yanke V., Hippler R., Atmospheric effect corrections of MuSTAnG data, *J. Space Weather Space Clim.*, 2015, Vol. 5, id. A6, DOI: 10.1051/swsc/2015007.
 17. Ganeva M., Peglow S., Hippler R., Berkova M., Yanke V., Seasonal variations of the muon flux seen by muon telescope MuSTAnG. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2013, 409, 012242, 201. DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012242.
 18. Dmitrieva A. N., Astapov I. I., Kovylyaeva A. A., Pankova D. V., Temperature effect correction for muon flux at the Earth surface: estimation of the accuracy of different methods, *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 409, 012130, DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012130.
 19. Berkova M.D., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Temperature effect of the muon component of cosmic ray and practical possibilities of its accounting. *Proc. 21st ECRS. Kosice, Slovakia, 9–12 September 2008*, pp. 123–126.
 20. База данных московского нейтронного монитора [сайт]. URL: <http://cr0.izmiran.ru/mosc/main.htm> (дата обращения 06.05.2021).
 21. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya A.K. Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the

- atmosphere, *Advances in Space Research*, 2009, Vol. 44, № 10, DOI: 10.1016/j.asr.2008.10.038.
22. Ford K., Harris J.R., Shives R., Carson J., Buckle J. Remote Predictive Mapping 2. Gamma Ray Spectrometry: A Tool for Mapping Canada's North, 2008, *Geoscience Canada*, Vol. 35. № 3–4. pp. 109-126.
 23. Grasty R.L. Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration theory and operational procedures *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, 1979, pp. 147-161.
 24. База данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений [сайт]. URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html> (дата обращения 17.06.2021).
 25. Данные измерений потоков протонов космическими аппаратами GOES [сайт]. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux> (дата обращения 23.04.2021).
 26. База данных OMNI [сайт]. URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 24.04.2021).
 27. Трефилова Л.А., Кобелев П.Г., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Понижение интенсивности космических лучей в мае 2019 года в 24-м солнечном цикле. “Physics of Auroral Phenomena”, 2020, Proc. XLIII Annual Seminar, Apatity, pp. 80-83, DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.019.