

ФИЗИКА

Научная статья

УДК 524.1-73:539.1.07

Определение вариаций высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей сцинтилляционным методом с использованием стратосферного спутника CubeSat 3U

Мартин Батарбиевич Масаев¹, Альберт Мусаевич Гангапшев², Аслан Узеирович Заммиев³, Кантемир Чамалович Бжихатлов⁴, Даниэль Эдуардович Болиев⁵, Якуб Ахматович Аккизов⁶

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

²Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

^{3,4}Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

^{5,6}ГБОУДАТ «Солнечный город», Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹masmartin@mail.ru

²gangapsh@list.ru

³zammoev@mail.ru

⁴haosit13@mail.ru

⁵anielboliev87@gmail.com

⁶akubakkizov32@gmail.com

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты разработки и экспериментальной реализации метода определения вариаций высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей с применением стратосферного спутника формата CubeSat 3U, оснащенного детектором на основе пластикового сцинтиллятора. Получено распределение интенсивности мюонной компоненты ВКЛ в диапазоне высот до 23,4 км. Основной максимум темпа счета, составивший 1270 имп/мин, зафиксирован на высоте 17 км. Вторая локальная вариация темпа счета (820 имп/мин) обнаружена на высоте 13,7 км. Зарегистрированные вариации интенсивности интерпретируются как следствие локальной генерации широких атмосферных ливней.

Ключевые слова: вторичные космические лучи, мюонная компонента, сцинтилляционный детектор, стратосферный спутник CubeSat, солнечная активность, широкий атмосферный ливень

Для цитирования: Масаев М.Б., Гангапшев А.М., Заммиев А.У., Бжихатлов К.Ч., Болиев Д.Э., Аккизов Я.А. Определение вариаций высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей сцинтилляционным методом с использованием стратосферного спутника CubeSat 3U // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 37–42.

PHYSICS

Original article

Determination of high-altitude distribution variations of the muon component of secondary cosmic rays by the scintillation method using a CubeSat 3U stratospheric satellite

Martin B. Masaev¹, Albert M. Gangapshiev², Aslan U. Zammoev³, Kantemir Ch. Bzhikhatlov⁴, Daniel E. Boliev⁵, Yakub A. Akkizov⁶

^{1,2}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nalchik, Russia

²Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{3,4}Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kabardino-Balkarian Republik, Nalchik, Russia

^{5,6}State Educational Institution of Additional Education "Sunny City", Kabardino-Balkarian Republik, Nalchik, Russia

¹masmartin@mail.ru

²gangapsh@list.ru

³zammoev@mail.ru

⁴haosit13@mail.ru

⁵anielboliev87@gmail.com

⁶akubakkizov32@gmail.com

Abstract. This paper presents the results of the development and experimental implementation of a method for determining the variations in the altitude distribution of the muon component of secondary cosmic rays using a CubeSat 3U stratospheric satellite equipped with a plastic scintillator detector. The distribution of the intensity of the muon component of SCR in the altitude range up to 23.4 km has been obtained. The main maximum of the counting rate, which was 1270 imp/min, was recorded at an altitude of 17 km. The second local variation of the counting rate (820 imp/min) was detected at an altitude of 13.7 km. The recorded variations in intensity are interpreted as a result of the local generation of wide-area atmospheric showers.

Keywords: secondary cosmic rays, muon component, scintillation detector, stratospheric satellite CubeSat, solar activity, extensive air shower

For citation: Masaev M.B., Gangapshv A.M., Zammoev A.U., Bzhikhatlov C.Ch., Boliev D.E., Akkizov Ya.A. Determination of high-altitude distribution variations of the muon component of secondary cosmic rays by the scintillation method using a CubeSat 3U stratospheric satellite // Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(2):37–42. (In Russ.).

Введение

Изучение высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей (ВКЛ) в контексте вариаций солнечной активности представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес [1–5]. Актуальность данных исследований обусловлена необходимостью решения ряда задач, среди которых:

1. **Проведение оценки радиационной безопасности авиации.** Пространственное распределение ВКЛ является критическим параметром для оценки радиационной нагрузки на высотах магистральных авиалиний (8–12 км), где наблюдается максимум интенсивности мюонной компоненты [3, 6].

2. **Осуществление мониторинга солнечной активности.** Регистрация вариаций мюонного потока позволяет отслеживать 11-летние циклы активности Солнца и прогнозировать магнитные бури, оказывающие дестабилизирующее воздействие на навигационное оборудование и системы связи [6, 7].

3. **Исследование гелиосферных возмущений.** В периоды минимума солнечной активности высокоскоростной солнечный ветер выступает основным фактором возмущения межпланетного магнитного поля, модулирующего галактический поток космических лучей [5, 7].

Первичные космические лучи (протоны и ядра тяжелых элементов), взаимодействуя с атмосферой Земли на высотах 80–90 км, инициируют каскад вторичных частиц [2, 4]. Жесткая мюонная компонента ВКЛ, обладающая высокой проникающей способностью, достигает поверхности Земли, формируя существенную долю естественного радиационного фона [3]. Максимумы интенсивности мюонной компоненты традиционно приходятся на высоты 12–17 км (давление ~ 80 тор), в непосредственной близости от которых (8–12 км) располагаются эшелоны полетов гражданской авиации [8]. В периоды повышенной солнечной активности на данных высотах наблюдается генерация широких атмосферных ливней (ШАЛ) с интенсивностью до 10^{10} частиц [2, 5].

Цель работы: разработка и экспериментальная реализация метода определения вариаций высотного распределения мюонной компоненты ВКЛ с использованием стратосферного спутника формата CubeSat 3U, оснащенного сцинтилляционным детектором, с обеспечением регистрации данных в режиме реального времени.

Методика и оборудование эксперимента

В ходе эксперимента в качестве основного был использован телеметрический метод передачи данных в режиме реального времени с интервалом дискретизации 5 с. В качестве регистрирующего элемента применялся пластиковый органический сцинтиллятор на основе полистирола, легированного первичным активатором РРО и вторичным сместителем спектра РОРОР, габаритами $12 \times 12 \times 3$ см³ (площадь регистрирующей поверхности 144 см²).

Основные характеристики детектора: время высвечивания: ≤ 5 нс; световыход: 50–60 %; удельное энерговыделение мюонов: 2 МэВ·см²/г; полное энерговыделение при толщине 3 см: 6 МэВ; эффективность регистрации заряженных частиц: ~ 100 %. Сбор полезного сигнала от сцинтиллятора осуществлялся через оптоволокно с помощью кремниевого фотоэлектронного умножителя (SiPM) модели PM3325-WB-D0.

Оценочный расчет показал, что при средней интенсивности мюонов на уровне моря 1 мюон/(см²·мин) = 0,0167 Бк/см² [2, 3], для площади детектора 144 см² ожидаемый начальный темп счета составляет:

$$N = 144 \text{ см}^2 \times 1 \text{ мюон}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}) = 144 \text{ соб}/\text{мин} = 2,4 \text{ Бк}.$$

С учетом высоты старта над уровнем моря (169 м) ожидаемое начальное увеличение темпа счета не превышает ~ 3 –5 %.

Высота полета определялась барометрическим методом с использованием гипсометрической формулы:

$$h = h_0 + \frac{RT_{avg}}{gM} \ln \left(\frac{P_0}{P} \right),$$

где h – искомая высота (м), h_0 – опорная высота (м) = 169 м (высота над уровнем моря в точке старта), R – универсальная газовая постоянная (8,314462618 Дж/моль К), T_{avg} – средняя абсолютная температура (в Кельвинах) слоя воздуха между высотами h и h_0 , т. е. среднее арифметическое температур на

двух уровнях: $T_{avg} = \frac{T_0 + T}{2}$, где T_0 – температура на уровне $h_0 = 24$ °C (температура в точке старта),

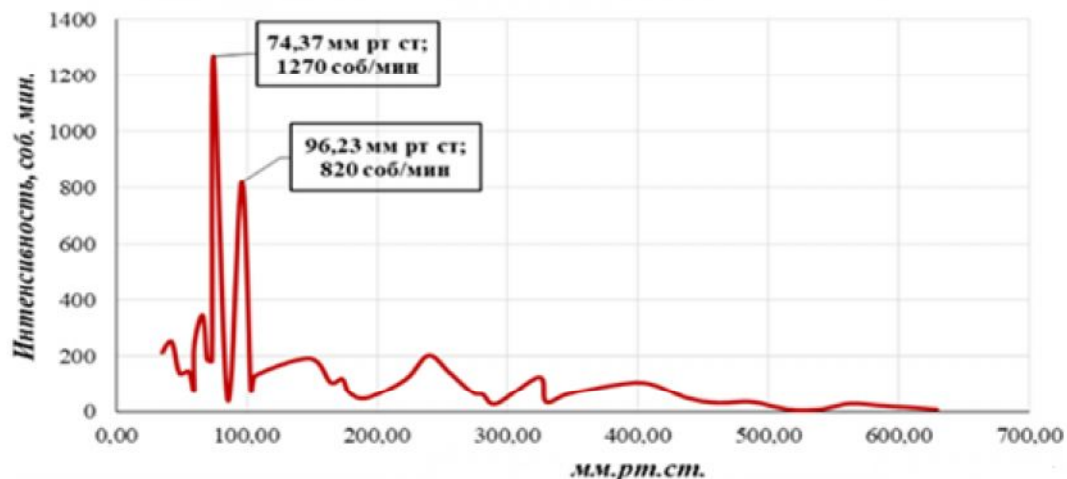
T – температура на уровне h , g – ускорение свободного падения ($\sim 9,80665$ м/с²), M – молярная масса сухого воздуха ($\sim 0,0289644$ кг/моль), P_0 – давление на опорной высоте h_0 (например, на уровне моря) = 98611 Па (давление в точке старта = 739,58 тор), P – давление на высоте h (1 тор = 0,75 мбар).

В исследовании использовалась платформа стандарта CubeSat формата 3U (модуль 1U имеет габариты $10 \times 10 \times 10$ см и массу до 1,33 кг). Рабочий объем спутника, включая конструктивы и полезную нагрузку (детектор), был термостатирован с использованием нагревательной ленты с термодатчиком и теплоизолирующего материала.

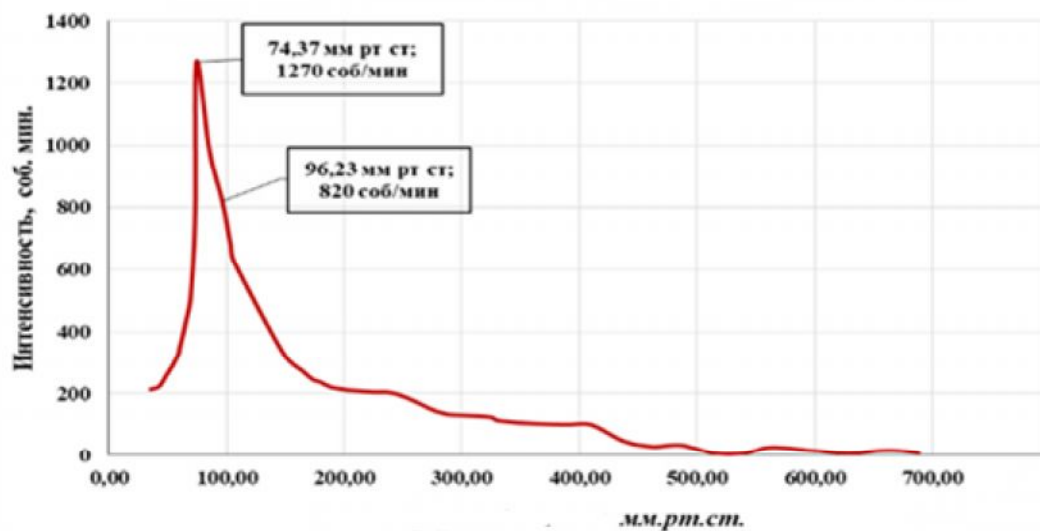
Результаты эксперимента

Экспериментальные измерения были проведены в сентябре 2025 года (период с 17 по 23 сентября) в рамках Всероссийского чемпионата по программе «Стратосферный спутник-2025» в наукограде Черноголовка (Московская область) при поддержке Госкорпорации «Роскосмос» и организатора ООО «Стратонавтика». Максимальная достигнутая высота подъема составила 23 408 м. Общее количество измерений на этапе подъема: 470 (с шагом ~ 50 м по высоте).

Основные результаты измерений высотного распределения интенсивности мюонов систематизированы в таблице 1 и визуализированы на рисунке 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Исходный (а) и итоговый (б) графики зависимости темпа счета мюонной компоненты от величины атмосферного давления после обработки

Из данных *таблицы 1* следует, что максимум интенсивности с темпом счета 1270 имп/мин зафиксирован на высоте 17 км при давлении 74,37 тор. На высоте 13,7 км обнаружен вторичный пик интенсивности, с темпом 820 имп/мин при давлении 96,23 тор. Эти значения вариаций темпа счета существенно превышают классические данные кривой Регенера–Пфотцера (максимум ~270 имп/мин на высоте 16 км) [8]. По результатам измерений установлено, что зависимость температуры окружающей среды от высоты показывает характерное снижение до -57°C на отметке 17 км, что полностью согласуется с моделью стандартной атмосферы.

Таблица 1 – Результаты измерений высотного распределения мюонной компоненты

Высота, км	Давление, мм рт. ст.	Темп счета, имп/мин	Температура, $^{\circ}\text{C}$
0,45 (старт)	739,58	~150	+24
13,7	96,23	820	-55
17,0	74,37	1270 (макс.)	-57
23,4	25,80	450	-52

Обсуждение результатов

Наблюдаемое превышение интенсивности мюонной компоненты над эталонными значениями (в 4,7 раза в точке максимума) интерпретируется как следствие эффекта солнечной модуляции – возрастания потока ВКЛ в периоды солнечных вспышек [6–9]. В период проведения эксперимента (17–23 сентября 2025 г.), согласно данным Московского нейтронного монитора (ИЗМИРАН, г. Троицк), фиксировалась высокая вариативность солнечной активности в рамках 25-го 11-летнего цикла (начало: декабрь 2019 г., прогнозируемое завершение: ~ 2030 г.) [6]. Выявление двух областей повышенной интенсивности свидетельствует о локальной генерации широких атмосферных ливней субатомных частиц (ШАЛ):

1. Первая область (17 км, 1270 имп/мин) коррелирует с классическим положением максимума Пфотцера [8].

2. Вторая область (13,7 км, 820 имп/мин) указывает на дополнительную каскадную генерацию ливня.

Полученные данные согласуются с гипотезой о том, что в высотном диапазоне 13-17 км вероятность зарождения и развития ШАЛ является максимальной [2, 5].

Заключение

1. Разработана и конструктивно реализована измерительная установка на базе сцинтилляционного детектора в стандарте стратосферного спутника CubeSat 3U. Выполнен успешный экспериментальный запуск, с регистрацией высотного распределения ВКЛ до высоты 23,4 км.

2. Зарегистрирован максимум интенсивности 1270 имп/мин на высоте 17 км, что в 4,7 раза превышает эталонные данные кривой Регенера – Пфотцера. Обнаружена значительная локальная вариация интенсивности (820 имп/мин) на высоте 13,7 км, свидетельствующая о генерации широких атмосферных ливней.

3. Экспериментально подтверждено наличие эффекта солнечной модуляции интенсивности ВКЛ в период максимума 25-го цикла солнечной активности. Разработанный методический подход перспективен для мониторинга космической погоды, регистрации вариаций солнечной активности и оценки радиационной обстановки при авиационных перелетах.

Библиография

1. Иваненко Д.Д. Космические лучи и новые «полутяжелые» частицы // Успехи физических наук. 1938. Т. 19, № 3. С. 322–352.
2. Мурзин В.С. Физика космических лучей: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1970. 285 с.
3. Сокуров В.Ф. Физика космических лучей: космическая радиация. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. 188 с.
4. Панасюк М.И. Странники Вселенной или Эхо Большого взрыва. М.: Век 2, 2005. 272 с.
5. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 464 с.
6. Горчаков Е.В., Базилевская Г.А. Измерения интенсивности заряженных частиц после хромосферной вспышки 7 июля 1958 г. // Искусственные спутники Земли. 1961. № 8. С. 84–86.
7. Мирошниченко Л.И. Космические лучи. Физическая энциклопедия. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1990. С. 471–474.
8. Regener E., Pfozter V. Vertical intensity of cosmic rays // Nature. 1938. V. 141. P. 377–378.
9. Гинзбург В.Л. Космические лучи: 75 лет исследований и перспективы на будущее // Земля и Вселенная. 1988. № 3. С. 3–9.

References

1. Ivanenko D.D. Cosmic Rays and New "Semi-Heavy" Particles. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Physics-Uspekhi*. 1938;19(3):322–352. (In Russ.).
2. Murzin V.S. Physics of Cosmic Rays: A Textbook. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 285 p. (In Russ.).
3. Sokurov V.F. Physics of Cosmic Rays: Cosmic Radiation. Rostov-an-Don: Feniks; 2005. 188 p. (In Russ.).

4. Panasyuk M.I. Wanderers of the Universe, or Echo of the Big Bang. Moscow: Vek 2; 2005. 272 p. (In Russ.).
5. Dorman L.I. Experimental and Theoretical Foundations of Cosmic Ray Astrophysics. Moscow: Nauka; 1975. 464 p. (In Russ.).
6. Gorchakov E.V., Bazilevskaya G.A. Measurements of the intensity of charged particles after the chromospheric flare of July 7, 1958. *Iskusstvennye Sputniki Zemli = Artificial Earth Satellites*. 1961;8:84–86. (In Russ.).
7. Miroshnichenko L.I. Cosmic rays. Physical Encyclopedia. Vol. 2. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1990. P. 471–474. (In Russ.).
8. Regener E., Pfotzer V. Vertical intensity of cosmic rays. *Nature*. 1938;141:377–378.
9. Ginzburg V.L. Cosmic rays: 75 years of research and future prospects // *Earth and the Universe*. 1988. No. 3. pp. 3–9. (In Russ.).