

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 523.4-854

КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ЭЛЕКТРОНАХ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ

Д.Н. Морозова^{1,*}, А.В. Кузнецов², А.Г. Майоров¹, К.С. Челидзе¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

²Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, 150000, Россия

*e-mail: dashia110999@mail.ru

Поступила в редакцию: 03.10.2023

После доработки: 12.10.2023

Принята к публикации: 24.10.2023

По данным эксперимента PAMELA обнаружены высыпания электронов из радиационного пояса Земли в моменты регистрации гамма-всплесков внеземного происхождения, что порождает гипотезу о взаимосвязи этих явлений. В работе приводятся оценки количества электронов, испытавших взаимодействие с гамма-квантами посредством эффекта Комптона и изменивших свою энергию и траектории в приближении так называемой «игрушечной модели». Получены формула для определения сечения взаимодействия гамма-кванта и покоящегося электрона в зависимости от угла вылета электрона и энергетический спектр вылетевших электронов. В распределении вторичных электронов по энергиям наблюдается узкий пик вблизи максимальной энергии, которая близка к энергии начального гамма-кванта. Проведена оценка верхней границы для вклада рассматриваемого процесса в превышение темпа счета электронов над фоновым значением, зарегистрированных в эксперименте PAMELA. Получено, что предложенный механизм не позволяет объяснить наблюдаемый эффект, рассчитанный темп счета электронов оказывается на несколько порядков ниже, что объясняется малым сечением комптоновского рассеяния.

Ключевые слова: PAMELA, Fermi-LAT, гамма-всплеск, радиационный пояс Земли, высыпания частиц.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.273

ВВЕДЕНИЕ

Физика космических лучей в околоземном пространстве является важным направлением современных экспериментальных и теоретических исследований. В том числе сегодня активно изучаются характеристики радиационных поясов Земли (РПЗ) и процессов, происходящих с захваченными частицами [1]. Один из них проявляется в виде высыпаний захваченных космических лучей из внутреннего и внешнего радиационных поясов под действием электромагнитного излучения разной природы [2–5]. В экспериментах по регистрации заряженных частиц в околоземном пространстве [6–10] высыпания наблюдаются в виде резкого увеличения числа заряженных частиц во временных рядах данных – всплесков.

Существует ряд работ, посвященных взаимосвязи наблюдаемых всплесков с различными солнечно-магнитными и геофизическими процессами [11–15]. Действительно, некоторые из наблюдаемых всплесков частиц можно связать с

такими явлениями, но, по-видимому, это не все процессы, вызывающие высыпания частиц. До настоящего времени внимание не уделялось влиянию на потоки заряженных частиц в околоземном пространстве электромагнитного излучения галактического или внегалактического происхождения. Известно, что гамма-всплески являются наиболее мощным источником гамма-излучения во Вселенной, поэтому решено рассмотреть их как возможную причину возникновения высыпаний частиц из РПЗ. На текущий момент уже проведена обработка экспериментальных данных, в работах [16] и [17] описывается анализ темпов счета детекторов времяпролетной системы в эксперименте PAMELA [18] в моменты регистрации гамма-всплесков обсерваторией Fermi [19]. Обнаружено несколько событий, когда возникает значимое отклонение темпа счета от фоновых значений в момент прихода излучения гамма-всплеска. Данная статья посвящена теоретическому обоснованию наблюдаемого эффекта для высыпаний частиц в момент прихода к Земле гамма-всплеска

GRB090323002. В этот период времени в эксперименте PAMELA наблюдается увеличение темпа счета над фоном в нескольких измерительных конфигурациях (триггерах) [20], в том числе в одной из них до $dN/dt \approx 40 \text{ с}^{-1}$. При этом необходимая минимальная энергия электронов для выработки триггеров около 100 МэВ.

В качестве наиболее естественного объяснения наблюдаемого эффекта можно предложить процесс комптон-эффекта космического гамма-кванта на захваченном в РПЗ электроне. В этом случае предполагается, что гамма-квант в результате взаимодействия передает электрону количество энергии, достаточное для выхода из радиационного пояса, после чего электрон регистрируется прибором. Учитывая, что интервал энергий гамма-квантов в гамма-всплеске – от кэВ до десятков ГэВ, а для регистрации прибором электрону необходимо иметь энергию свыше 100 МэВ, в работе использовано приближение покоящегося начального электрона.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Энергетический спектр гамма-излучения обычно имеет степенной вид:

$$\frac{dI_\gamma}{d\omega} = k \left(\frac{\omega}{\text{МэВ}} \right)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где I_γ – полный поток гамма-квантов; k – коэффициент пропорциональности; ω – энергия начального гамма-кванта.

Из измерений прибора LAT [21], входящего в состав обсерватории Fermi, можно получить зависимость потока гамма-квантов от энергии в диапазоне от 100 МэВ до 10 ГэВ (низкие энергии, наблюдаемые прибором GBM, не использованы в работе из-за порога регистрации электронов прибором PAMELA). В качестве примера рассмотрен гамма-всплеск GRB090323002, значения спектрального индекса γ и полного потока гамма-квантов I_γ взяты из публикации [22, табл. 4].

Коэффициент k вычислен следующим образом:

$$I_\gamma = \int_a^b k \left(\frac{\omega}{\text{МэВ}} \right)^{-\gamma} d \left(\frac{\omega}{\text{МэВ}} \right) = k \frac{1}{1-\gamma} \left(\frac{\omega}{\text{МэВ}} \right)^{1-\gamma}, \quad (2)$$

где $a = 100 \text{ МэВ}$; $b = 10 \text{ ГэВ}$. Тогда

$$k = I_\gamma (1 - \gamma) / (\omega / \text{МэВ})^{1-\gamma} \Big|_a^b = 3.32 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ МэВ}^{-1}.$$

МЕТОДИКА

Используя инвариантное выражение для сечения комптон-эффекта [23], несложно записать его в системе покоя начального электрона в виде распределения конечных электронов по углу вылета:

$$\frac{1}{\pi r^2} \frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{16m^2(\omega+m)^2 \cos \theta \sin \theta}{((\omega+m)^2 - \omega^2 \cos^2 \theta)^2} \times \left\{ \frac{m^2}{4\omega^2} \left(1 - \frac{m}{E' - p' \cos \theta} \right)^2 + \frac{m}{2\omega} \left(1 - \frac{m}{E' - p' \cos \theta} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{m}{E' - p' \cos \theta} + \frac{E' - p' \cos \theta}{m} \right) \right\},$$

$$0 < \theta < \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

где r – классический радиус электрона; ω – энергия начального гамма-кванта; m – масса электрона; θ – угол вылета; $E' = m \frac{(\omega+m)^2 + \omega^2 \cos^2 \theta}{(\omega+m)^2 - \omega^2 \cos^2 \theta}$ – энергия и $p' = \sqrt{E'^2 - m^2}$ – импульс конечного электрона.

Также можно записать инвариантное сечение комптон-эффекта [23] в системе покоя начального электрона в виде энергетического спектра вылетевших электронов:

$$\frac{1}{\pi r^2} \frac{d\sigma}{dE'} = \frac{m}{\omega^2} \left\{ \left(\frac{m(E' - m)}{\omega(\omega - E' + m)} \right)^2 - \frac{2m(E' - m)}{\omega(\omega - E' + m)} + \frac{\omega - E' + m}{\omega} + \frac{\omega}{\omega - E' + m} \right\},$$

$$m \leq E' \leq \frac{2\omega^2 + 2m\omega + m^2}{2\omega + m}. \quad (4)$$

Расчеты показывают, что вторичные электроны имеют направление движения, в основном совпадающее с направлением первичного гамма-кванта от гамма-всплеска, в распределении по энергиям наблюдается узкий пик вблизи максимальной энергии, которая близка к энергии начального гамма-кванта. Например, на рис. 1 изображены распределения сечения взаимодействия по углу вылета (слева) и по энергии (справа) электрона после взаимодействия с гамма-квантом с энергией 100 МэВ.

Для расчета указанного выше превышения темпа счета электронов над фоном, во-первых, необходимо определить число комптоновских событий, в которых рождается электрон с определенной энергией и углом вылета по отношению к направлению потока гамма-квантов. Во-вторых, рассчитать вероятность попадания данного электрона в детектор с учетом его распространения в магнитосфере Земли. В статье рассмотрена первая часть работы.

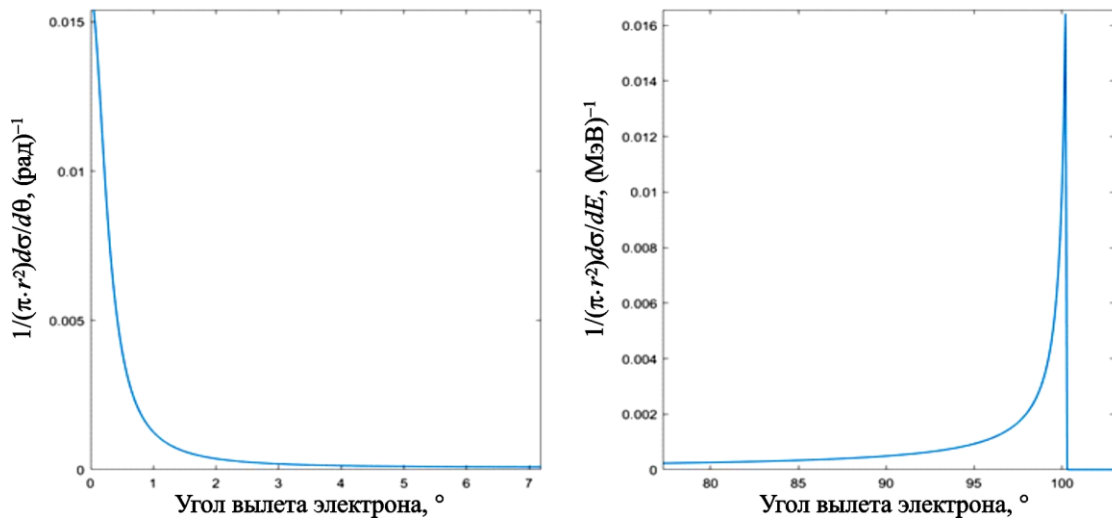


Рис. 1. Распределение сечения взаимодействия по углу вылета (слева) и по энергии (справа) электрона после взаимодействия с гамма-квантом с энергией 100 МэВ

Число комптоновских событий, приходящихся на объем dV и интервал времени dt , в которых рождается электрон с энергией в интервале от E' до $E' + dE'$, вылетающий в телесный угол $d\Omega'$, определяется выражением:

$$\frac{dv}{dE' d\Omega'} = c \frac{d\sigma}{dE' d\Omega'} \frac{1}{c} \frac{dI_\gamma}{d\omega} d\omega n_e dV dt, \quad (5)$$

где $dI_\gamma/d\omega$ – спектр гамма-квантов в гамма-всплеске; n_e – концентрация электронов в данной точке радиационного пояса; c – скорость света, дифференциальное сечение комптон-эффекта по энергиям и углам вылета конечных электронов определяется известным выражением [21], которое можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dE' d\Omega'} = 2\alpha^2 \frac{p'}{m\omega\omega'} \delta(\omega + m - \omega' - E') \times \\ \times \left[\left(\frac{m^2}{s-m^2} + \frac{m^2}{u-m^2} \right)^2 + \left(\frac{m^2}{s-m^2} + \frac{m^2}{u-m^2} \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{4} \left(\frac{u-m^2}{s-m^2} + \frac{s-m^2}{u-m^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь α – постоянная тонкой структуры; ω и ω' – энергии начального и конечного гамма-квантов; s, u – переменные Манделштама; δ – функция, выражающая закон сохранения энергии.

Для расчета по формуле (5) использован приведенный выше спектр гамма-квантов в гамма-всплеске $dI_\gamma/d\omega$. Также требуется задать пространственное распределение концентрации электронов в радиационном поясе, но в работе рассмотрена «игрушечная модель», которая позволяет оценить верхнюю границу для вклада комптон-эффекта в обсуждаемое превышение

над фоном темпа счета электронов, зарегистрированных в эксперименте PAMELA. Предполагается, что каждый гамма-квант из гамма-всплеска «выбивает» из радиационного пояса строго один электрон, передавая ему всю свою энергию и импульс (см. рис. 1), а также не учитывается влияние магнитосферы на движение выбитой частицы. Тогда темп счета электронов в детекторе, обусловленный данным процессом, можно представить в виде:

$$\frac{dN}{dt} = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} d\omega \frac{dI_\gamma}{d\omega} \cdot \Delta S, \quad (7)$$

где ΔS – рабочая площадь детектора, а в качестве $\omega_{\min}$ следует взять максимальную из двух величин: либо нижнюю границу спектра гамма-квантов в гамма-всплеске, либо величину порога регистрации электронов детектором.

Подставляя (1) в (7) и интегрируя от 100 МэВ до 10 ГэВ, при рабочей площади детектора $\Delta S = 20 \text{ см}^2$ получаем для темпа счета электронов в детекторе $dN/dt = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, что на несколько порядков меньше ожидаемого значения $dN/dt \approx 40 \text{ с}^{-1}$. Попытаемся экстраполировать формулу (4) на меньшие значения $\omega_{\min}$, пока что не принимая во внимание величину порога регистрации электронов детектором. Тогда для получения величины 40 с^{-1} следует положить $\omega_{\min} = 0.88 \text{ МэВ}$.

Таким образом, «игрушечная модель» с приближением покоящихся начальных электронов и даже стопроцентной конверсией гамма-квантов в электроны через комптон-эффект не позволяет объяснить обсуждаемое превышение над фоном темпа счета электронов, зарегистри-

КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОНАХ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ

рованных в эксперименте PAMELA, если рассматривать нижнюю границу, для которой определен поток I_γ в каталогах гамма-всплесков эксперимента Fermi. Наблюдаемый эффект может быть объяснен при выборе нижней энергетической границы гамма-квантов ~ 1 МэВ, однако при этом необходимо рассматривать изменение питч-углового распределения захваченных частиц для возникновения высыпания, а также уйти от приближения покоящегося электрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проводился анализ гипотезы о существовании взаимосвязи высыпаний частиц из радиационных поясов Земли с гамма-всплесками внеземного происхождения. В качестве предполагаемого механизма взаимодействия захваченных электронов с гамма-квантами рассмотрен эффект комптоновского рассеяния. Приведена «игрушечная модель», предполагающая приближение покоящегося электрона, а также допускающая рассеяние каждого гамма-кванта на электроны с передачей ему всей энергии. Модель применена для анализа наблюдаемого в эксперименте PAMELA отклонения темпа счета частиц от фоновых значений в момент прихода гамма-излучения от всплеска GRB090323002. Показано, что рассмотренный процесс в таком приближении не позволяет объяснить экспериментальный результат для значений минимальной энергии гамма-кванта около 100 МэВ, однако при ее понижении до ~ 1 МэВ согласие с измерениями может быть достигнуто.

Дальнейшее развитие работы связано с учетом энергетического и пространственного распределений захваченных электронов, расчетом высыпаний частиц вследствие изменения их питч-углового распределения под действием космического гамма-излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161, <https://rscf.ru/project/19-72-10161/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovtyukh A.S. Ion Composition of the Earth's Radiation Belts in the Range from 100 keV to

100 MeV/nucleon: Fifty Years of Research // Space Science Reviews, 2018. V. 214. № 124. 30 p.

2. Sgrigna V., Carota L., Conti L., et al. Correlations between earthquakes and anomalous particle bursts from SAMPEX/PET satellite observations // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2005. V. 67. P. 1448–1455.

3. Parrot M., Berthelier J.J., Lebreton J.P., et al. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions // Physics and Chemistry of the Earth, 2006. V. 31. P. 486–495.

4. Александрин С.Ю., Гальпер А.М., Кольдашов С.В. и др. Изучение локальных возмущений радиационного пояса в спутниковых экспериментах «АРИНА» и «ВСПЛЕСК» // Труды 31-й Всероссийской конференции по космическим лучам, М.: МГУ, 2010.

5. Fidani C., Battiston R., Burger W.J. A study of the correlation between earthquakes and NOAA satellite energetic particle bursts // Remote Sensing, 2010. V. 2, P. 2170–2184.

6. Akimov V.V., Voronov S.A., Galper A.M. et al. Gamma ray telescope GAMMA-1 // Space Science Review, 1988. V. 49. P. 111–124.

7. Baker, D.N., Mason, G.M., Figueroa, O. et al. An overview of the solar, anomalous, and magnetospheric particle explorer (SAMPEX) mission // IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing, 1993. V. 31. № 5. P. 531–541.

8. Voronov S.A., Galper A.M., Koldashov S.V. et al. Maria-2 charged particles' magnetic spectrometer // Приборы и техника эксперимента, 1991. № 2. P. 59–62.

9. Александров А.П., Воронов С.А., Гальпер А.М. и др. Эксперимент по исследованию потоков заряженных частиц высоких энергий на орбитальном научном комплексе Мир (эксперимент Мария-2). М.: МИФИ, 1988.

10. Бакалдин А.В., Батищев А.Г., Воронов С.А. и др. Эксперимент «АРИНА» на КА «Ресурс-ДК1» по изучению прогностических характеристик всплесков высокоэнергетичных заряженных частиц – предвестников землетрясений // Научная сессия МИФИ-2007. Т. 7 Астрофизика и космофизика. Проблемы современной математики. Физика пучков и ускорительная техника, 2007. С. 66–68.

11. Aleksandrin S.Yu., Galper A.M., Zharaspaev T.R., Koldashov S.V. Temporal and energy characteristics of high-energy electron bursts in the Earth's magnetosphere that are associated with geophysical processes // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015. V. 79. № 5. P. 646–648.

12. Aleksandrin S.Yu., Galper A.M., Koldashov S.V., et al. High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors // Annales Geophysicae, 2003. V. 21. Is. 2. P. 597–602.

13. Galper A.M., Koldashov S.V., Voronov S.A. High-energy particle flux variations as earthquake pre-

dictors // *Advances in Space Research*, 1995. V. 15. Is. 11. P. 131–134.

14. Molchanov O.A., Majaeva O.A., Protopopov M.L. Observation of electromagnetic emissions of seismic origin on board INTERCOSMOS-24 satellite // *Cosmic Research*, 1992. V. 32. № 6. P. 128–137.

15. Гальпер А.М., Дмитриенко В.В., Никитина Н.В. и др. О возможности предсказания землетрясений по изменению потоков высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. М.: МИФИ, 1988.

16. Morozova D.N., Mayorov A.G. Search for the Relationship between Particle Precipitation from the Earth's Radiation Belt and Cosmic Gamma-Ray Bursts // *Physics of Atomic Nuclei*, 2021. V. 84. Is. 9. P. 1636–1640.

17. Морозова Д.Н., Майоров А.Г. Взаимосвязь высыпаний частиц из радиационного пояса Земли и космических гамма-всплесков // Труды XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», 2022. С. 240–242.

18. Picozza P., Galper A.M., Castellini G., et al. PAMELA – a payload for antimatter matter exploration

and light-nuclei astrophysics // *Astroparticle Physics*, 2007. V. 27. № 4. P. 296–315.

19. von Kienlin A., Meegan C.A., Paciesas W.S. et al. The Fourth Fermi-GBM Gamma-Ray Burst Catalog: A Decade of Data // *The Astrophysical Journal*, 2020. V. 893. № 1. P. 46–50.

20. Barbarino G., Boscherini M. Campana D., et al. The PAMELA time-of-flight system status report // *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2003. V. 125. P. 298–302.

21. Atwood W.B., Abdo A., Ackermann M., et al. The Large Area Telescope on the Fermi gamma-ray space telescope mission // *The Astrophysical Journal*, 2009. V. 697. P. 1071–1102.

22. Ackermann M., Ajello K., Asano M., et al. The first Fermi-LAT gamma-ray burst catalog // *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2013. Vol. 209. № 1. article id. 11. 90 p.

23. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Путаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989. 728 с.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 5, pp. 262–267

COMPTON SCATTERING OF COSMIC GAMMA RADIATION BY ELECTRONS IN THE EARTH'S RADIATION BELTS

D.N. Morozova¹, A.V. Kuznetsov², A.G. Mayorov¹, K.S. Chelidze¹

¹National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia

²Yaroslavl State University named after. P.G. Demidova, Yaroslavl, 150000, Russia

*e-mail: dashia110999@mail.ru

Received October 03, 2023; revised October 12, 2023; accepted October 24, 2023

According to the PAMELA experiment, precipitation of electrons from the Earth's radiation belt was detected at the moments of recording gamma-ray bursts of extraterrestrial origin, which gives rise to a hypothesis about the relationship of these phenomena. The work provides estimates of the number of electrons that have experienced interaction with gamma quanta through the Compton effect and have changed their energy and trajectories in the so-called approximation. «toy model» A formula has been obtained for determining the cross section for the interaction of a gamma quantum and a stationary electron depending on the electron emission angle and the energy spectrum of the emitted electrons. In the energy distribution of secondary electrons, a narrow peak is observed near the maximum energy, which is close to the energy of the initial gamma quantum. An estimate of the upper limit for the contribution of the process under consideration to the excess of the electron count rate over the background value recorded in the PAMELA experiment was carried out. It was found that the proposed mechanism does not explain the observed effect; the calculated electron count rate is several orders of magnitude lower, which is explained by the small Compton scattering cross section.

Keywords: PAMELA, Fermi-LAT, gamma-ray burst, Earth's radiation belt, particle precipitation.

REFERENCES

1. Kovtyukh A.S. Ion Composition of the Earth's Radiation Belts in the Range from 100 keV to 100 MeV/nucleon: Fifty Years of Research. *Space Science Reviews*, 2018. Vol. 214. No. 124. 30 p.

2. Sgrigna V., Carota L., Conti L., et al. Correlations between earthquakes and anomalous particle bursts from SAMPEX/PET satellite observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005. Vol. 67. Pp. 1448–1455.

3. Parrot M., Berthelier J.J., Lebreton J.P., et al. Examples of unusual ionospheric observations made by the

DEMETER satellite over seismic regions. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006. Vol. 31. Pp. 486–495.

4. Aleksandrin S.Yu., Galper A.M., Koldashov S.V. *et al.* Izucheniye lokalnykh vozmushcheniy radiatsionnogo poiasa v sputnikovykh eksperimentakh «ARINA» i «VSPLESK» [Studying Local Disturbances of the Radiation Belt in Satellite Experiments 'ARINA' and 'VSPLESK']. *Trudy 31 Vserossiyskoy konferentsii po kosmicheskim lucham*, Moscow, MGU, 2010 (in Russian).

5. Fidani C., Battiston R., Burger W.J. A study of the correlation between earthquakes and NOAA satellite energetic particle bursts. *Remote Sensing*, 2010. Vol. 2. Pp. 2170–2184.

6. Akimov V.V., Voronov S.A., Galper A.M. *et al.* Gamma ray telescope GAMMA-1. *Space Science Review*, 1988. Vol. 49. Pp. 111–124.

7. Baker D.N., Mason G.M., Figueroa O. *et al.* An overview of the solar, anomalous, and magnetospheric particle explorer (SAMPEX) mission. *IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing*, 1993. Vol. 31. No. 5. Pp. 531–541.

8. Voronov, S.A., Galper, A.M., Koldashov, S.V. *et al.* Maria-2 charged particles' magnetic spectrometer. *Pribori i Tehnika Eksperimenta*, 1991. No. 2. Pp. 59–62.

9. Aleksandrov A.P., Voronov S.A., Galper A.M. *et al.* Eksperiment po issledovaniyu potokov zarazhennykh chastits vysokikh energiy na orbital'nom nauchnom komplekse Mir (eksperiment Mariya-2) [Experiment on High-Energy Charged Particle Flux Studies on the Mir Orbital Scientific Complex (Maria-2 Experiment)]. Moscow, MIFI Publ, 1988 (in Russian).

10. Bakaldin A.V., Batishchev A.G., Voronov S.A., *et al.* Eksperiment «ARINA» na KA «Resurs-DK1» po izucheniyu prognozticheskikh kharakteristik vspleskov vysokoenergetichnykh zarazhennykh chastits – predvestnikov zemletryaseniya [The 'ARINA' Experiment on the 'Resource-DK1' Satellite for Studying Predictive Characteristics of High-Energy Charged Particle Bursts – Precursors to Earthquakes]. *Nauchnaya sessiya MIFI-2007. T. 7. Astrofizika i kosmofizika. Problemy sovremennoy matematiki. Fizika puchkov i uskoritel'naya tekhnika*, 2007. Pp. 66–68 (in Russian).

11. Aleksandrin S.Yu., Galper A.M., Zharaspaev T.R., Koldashov S.V. Temporal and energy characteristics of high-energy electron bursts in the Earth's magnetosphere that are associated with geophysical processes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2015. Vol. 79. No. 5. Pp. 646–648.

12. Aleksandrin S.Yu., Galper, A.M., Koldashov S.V., *et al.* High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors. *Annales Geophysicae*, 2003. Vol. 21. Is. 2. Pp. 597–602.

13. Galper A.M., Koldashov S.V., Voronov S.A. High-energy particle flux variations as earthquake predictors. *Advances in Space Research*, 1995. Vol. 15. Is. 11. Pp. 131–134.

14. Molchanov O.A., Majaeva O.A., Protopopov M.L. Observation of electromagnetic emissions of seismic origin on board INTERCOSMOS-24 satellite. *Cosmic Research*, 1992. Vol. 32. No. 6. Pp. 128–137.

15. Galper A.M., Dmitrienko V.V., Nikitina N.V. *et al.* O vozmozhnosti predsazhaniya zemletryaseniya po izmeneniyu potokov vysokoenergetichnykh zarazhennykh chastits v okolozemnom kosmicheskom prostranstve [On the Possibility of Predicting Earthquakes Based on Changes in High-Energy Charged Particle Fluxes in Near-Earth Space]. Moscow, MIFI Publ, 1988 (in Russian).

16. Morozova D.N., Mayorov A.G. Search for the Relationship between Particle Precipitation from the Earth's Radiation Belt and Cosmic Gamma-Ray Bursts. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021. Vol. 84. Is. 9. Pp. 1636–1640.

17. Morozova D.N., Mayorov A.G. Vzaimosvyaz' vysypaniy chastits iz radiatsionnogo poiasa Zemli i kosmicheskikh gamma-vspleskov [The Relationship between Particle Ejections from Earth's Radiation Belt and Cosmic Gamma-Ray Bursts]. *Trudy XVII Konferentsii molodykh uchenykh «Vzaimodeystviye poley i izlucheniya s veshchestvom»*, 2022. Pp. 240–242 (in Russian).

18. Picozza P., Galper A.M., Castellini G., *et al.* PAMELA – a payload for antimatter matter exploration and light-nuclei astrophysics. *Astroparticle Physics*, 2007. Vol. 27. No. 4. Pp. 296–315.

19. von Kienlin A., Meegan C.A., Paciesas W.S. *et al.* The Fourth Fermi-GBM Gamma-Ray Burst Catalog: A Decade of Data. *The Astrophysical Journal*, 2020. Vol. 893. No. 1. Pp. 46–50.

20. Barbarino G., Boscherini M., Campana D., *et al.* The PAMELA time-of-flight system status report. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2003. Vol. 125. Pp. 298–302.

21. Atwood W.B., Abdo A., Ackermann M., *et al.* The Large Area Telescope on the Fermi gamma-ray space telescope mission. *The Astrophysical Journal*, 2009. Vol. 697. Pp. 1071–1102.

22. Ackermann M., Ajello K., Asano M., *et al.* The first Fermi-LAT gamma-ray burst catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2013. Vol. 209. No. 1. Article id. 11. 90 p.

23. Berestetskii V.B., Lifshitz E.M., Pitayevskii L.P. *Kvantovaya elektrodinamika [Quantum Electrodynamics]*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 728 p.