

ВОЗМОЖНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ТЭВНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2024 г. А. П. Стужин^{1),*}, В. В. Михайлов¹⁾

Поступила в редакцию 11.10.2023 г.; после доработки 11.10.2023 г.; принята к публикации 11.10.2023 г.

Исследование электронного и позитронного спектра галактических космических лучей является важной задачей астрофизики высоких энергий. Необходимость использования новых методов регистрации электронов и позитронов обусловлена недостаточной статистической достоверностью данных современных экспериментов в ТэВном диапазоне энергий. В настоящей работе исследован один из возможных методов регистрации, основанный на использовании синхротронного излучения электронов и позитронов в магнитном поле Земли. С помощью моделирования траекторий высокоэнергетичных электронов, позитронов и испущенных ими синхротронных фотонов проведена оценка темпа счета детектора для орбиты МКС и РОС. Показана возможность разделения электронов и позитронов с помощью данного метода.

DOI: 10.31857/S0044002724030047, EDN: IWWXAB

1. ВВЕДЕНИЕ

Потоки легких компонент галактических космических лучей (ГКЛ) несут уникальную информацию об астрофизических процессах и объектах в Галактике. Они также могут пролить свет на природу темной материи. Позитроны и электроны ТэВных энергий испытывают значительные потери на синхротронное излучение и комптоновское рассеяние при распространении в межзвездной среде. Это приводит к ограничению на время жизни $t \sim 1.5 \times 10^5$ лет и расстоянию до источника $r \sim 100$ пк для данной компоненты космических лучей [1]. Например, 90% потока электронов с энергией 2 ТэВ испускается источниками, расстояние до которых не превышает 500 пк. Это значительно меньше, чем радиус диска Млечного Пути, который составляет $r \sim 15$ кпк, что позволяет исследовать локальные галактические источники.

На роль источников позитронов и электронов ГКЛ высоких энергий претендуют близкие пульсары, остатки сверхновых, процессы аннигиляции и распада гипотетических частиц темной материи. Также высказываются предположения об активных карликовых звездах, которые могут образовывать позитроны до энергий в несколько сотен ТэВ [2].

Для изучения характеристик различных источников необходимо различить спектральные особенности в потоках F_e^- и F_e^+ . Кроме того, важную роль играет отношение позитронного потока к суммарному $f(E) = F_e^+(E)/(F_e^-(E) + F_e^+(E))$, которое согласно общепринятой модели распространения ГКЛ должно уменьшаться с ростом энергии в предположении рож-

дения позитронов при взаимодействии космических лучей с межзвездной средой [3]. Однако результаты PAMELA [4] и последующие данные AMS-02 [5] показывают рост отношения с увеличением энергии от ~ 10 ТэВ до максимальной доступной для измерения энергии 1 ТэВ. Это опровергает модель вторичного рождения позитронов. Существующие экспериментальные данные активно пытаются объяснить наличием дополнительных позитронных источников, перечисленных выше.

На сегодняшний день данные о потоках электронов и позитронов ГКЛ получают посредством проведения прямых измерений с помощью космических детекторов AMS-02 [5], CALET [6], DAMPE [7] и Fermi-LAT [8], а также косвенных в экспериментах MAGIC [9], H.E.S.S., LHAASO [10, 11] на поверхности Земли. На рис. 1 показан спектр электронов, домноженный на энергию E^3 .

Современные космофизические эксперименты, как AMS-02, имеют меньшую статистику по сравнению с наземными. Это связано с техническими и конструкционными ограничениями на их размеры. Из рис. 1 видно, что к 2030 году спектр электронов может быть измерен по результатам AMS-02 только до 2 ТэВ [12]. В наземных экспериментах, таких как H.E.S.S., со значительно большей апертурой, чем в космических, осуществляют попытки продления спектра до более высоких энергий. Однако они испытывают значительные трудности с разделением адронной компоненты широких атмосферных ливней и электрон-позитронной. В частности, результаты эксперимента LHAASO позволяют только оценить верхний предел потока электронов в области энергий > 10 ТэВ [11].

¹⁾ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

* E-mail: starwarriors2@mail.ru

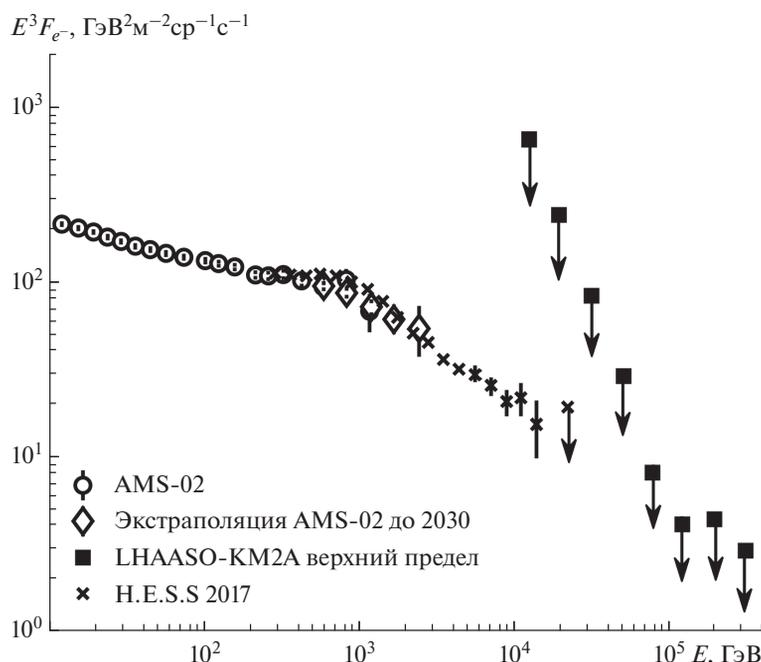


Рис. 1. Поток электронов по данным различных экспериментов, а также ожидаемый в AMS-02 к 2030 г. спектр электронов [9, 11, 12]. Данные H.E.S.S. взяты из [11].

Еще более трудной задачей является изучение позитронного спектра в ТэВном диапазоне энергий. Поток позитронов значительно меньше электронной и адронной компонент, что значительно усложняет процесс его измерения. Экспериментальные данные AMS-02 обрываются при энергиях ~ 1 ТэВ. Модификация детектора в 2025 году позволит продвинуться до энергии ~ 2 ТэВ [12]. Авторы работы [12] полагают, что это позволит отличить астрофизические модели происхождения позитронного избытка от моделей темной материи. Однако для дальнейших исследований потоков позитронов ТэВных энергий необходимо использовать новые методики регистрации.

Вопросы происхождения в Галактике высокоэнергетичных электронов и позитронов делают задачу постановки новых экспериментов с высокой эффективностью особенно актуальной. Интересной представляется идея измерения потока позитронов и электронов с помощью их синхротронного излучения в геомагнитном поле [13, 14]. В такой методике Земля выполняет роль магнитного спектрометра. В настоящей работе проведено моделирование условий регистрации позитронов и электронов в ТэВном диапазоне энергий детектором, работа которого основана на данной методике.

2. МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ

Исследовалось расположение детектора на орбите международной космической станции МКС с наклоном 51.6° и орбите планируемой высокоширотной российской орбитальной станции РОС с наклоном 96° – 97° на высоте 400 км.

Принципиальная схема предполагаемого детектора представлена на рис. 2. Планируется составная система из synchrotron radiation detector (SRD) и многослойного electromagnetic calorimeter (ECAL). Двигаясь в магнитном поле Земли по искривленной траектории электроны и позитроны испускают синхротронные фотоны, которые преимущественно регистрируются с помощью SRD. Сами заряженные частицы, попадая в калориметр и вызывая в нем электромагнитный ливень, регистрируются с помощью триггера от сцинтилляционных детекторов C1 и C2. Узкий конус испускания синхротронного излучения с углом раствора $\theta_{e^-,e^+} = \frac{mc^2}{E} \ll 1$ приводит к высокой линейности расположения зарегистрированных фотонов в плоскости детектора. Совмещая сигналы с C1, C2 и линейные события в SRD возможно идентифицировать электроны и позитроны.

Разделение электрон-позитронных и адронных событий может быть осуществлено как за счет измерения энерговыведения в ECAL, так и по сигналам в SRD. Протоны, ядра гелия и другие более тяжелые компоненты космических лучей, в сравнении с электронами и позитронами, испускают значительно менее интенсивное синхротронное излучение, а гамма-кванты от ядерных взаимодействий направлены к оси ливня. Таким образом, их распределение в плоскости детектора является практически симметричным.

Электроны и позитроны, двигаясь в геомагнитном поле, отклоняются в противоположные стороны, что приводит к различным расположениям их синхротронных фотонов в плоскости детектора. Зная точку попадания заряженной частицы в ECAL, можно

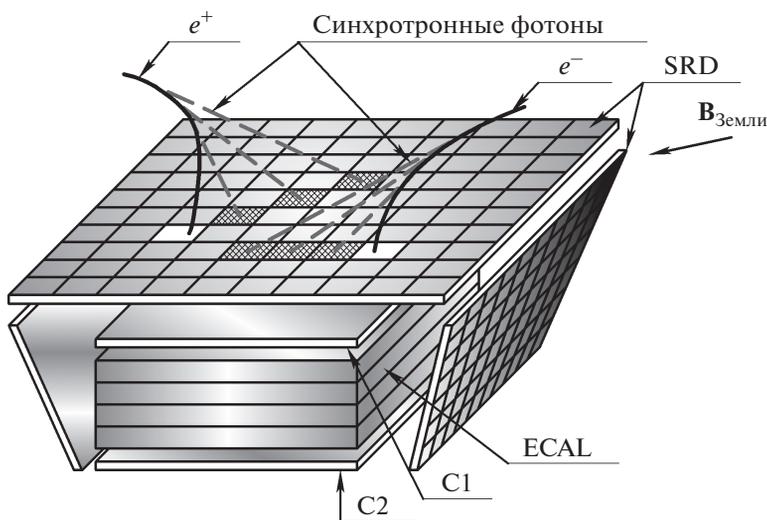


Рис. 2. Принципиальная схема предполагаемого детектора.

отличить эти частицы друг от друга. Для обнаружения линейного события и разделения электронных и позитронных событий необходимо зарегистрировать $N \geq 2$ фотонов. События с меньшим N не могут быть надежно разделены по знаку заряда и относятся к фоновым.

В работе рассматривалась простейшая конфигурация детектора с одной координатной плоскостью SRD, расположенной горизонтально, и детектором частиц под ней.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Методом Монте-Карло моделировались изотропные потоки электронов и позитронов с энергиями от 1 до 50 ТэВ. Их траектории движения в магнитном поле Земли, процесс испускания и попадания в SRD синхротронных фотонов рассчитывались на основе модели IGRF. Непосредственное моделирование детекторных систем и их откликов не проводилось. Отбор зарегистрированных событий осуществлялся на основании числа N попавших в SRD синхротронных фотонов и выбранного значения минимального числа фотонов $N_{\text{cut}} \geq 2$. По оценкам, представленным в работе [15], пространственное разрешение SRD должно составлять $\sim 1\text{--}2$ см. Поэтому в моделировании SRD разбивался на ячейки размером $1 \times 1 \text{ см}^2$. Кроме того, из энергетических спектров синхротронных фотонов следует, что детектор должен работать в диапазоне от 1 кэВ до 1 МэВ [15]. Эффективность регистрации фотонов каждой ячейкой принималась равной 80% исходя из предположения об использовании кристаллов CdZnTe (CZT) [16].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Разделение электронов и позитронов

Исследуемая методика позволяет отличать электронные и позитронные события по расположению

их синхротронных фотонов. На рис. 3 представлены распределения синхротронных фотонов в плоскости SRD площадью $1 \times 1 \text{ м}^2$ от электронов и позитронов на экваторе.

Видно, что максимумы распределений приходятся на различные области детектора. Анализ подобных распределений дает возможность определять отношение между электронным и позитронным потоком по совокупности событий.

Благодаря ECAL, C1 и C2 может быть определена точка регистрации электрона и позитрона в конкретном событии. С помощью моделирования можно рассчитать области наиболее вероятного расположения синхротронных фотонов относительно родительской частицы в SRD. После этого, определяя в эксперименте взаимное положение заряженной частицы и ее синхротронных фотонов, можно идентифицировать заряд частицы для конкретного события. Расчет показал, что в зависимости от среднего уровня фона N_b и минимального допустимого числа синхротронных фотонов при $N_{\text{cut}} > N_b$ вероятность неверного определения заряда не превышает 1–2%. Рисунок 4 демонстрирует вероятности неверного определения заряда частицы. В этих расчетах моделировался пуассоновский фон, равномерно распределенный по плоскости детектора. В дальнейшем необходимы тщательные исследования реальных фоновых условий на различных орбитах и учет обратного тока в самом приборе.

4.2. Темп счета

Важной характеристикой, определяющей эффективность эксперимента, является темп счета. Для оценки использовались измерения CALET, DAMPE и FERMI о суммарном электрон-позитронном потоке ГКЛ [6–8]. С шагом 30° смоделированы горизонтальные расположения детектора на круговых орбитах МКС и РОС на высоте 400 км. Для расчета геометри-

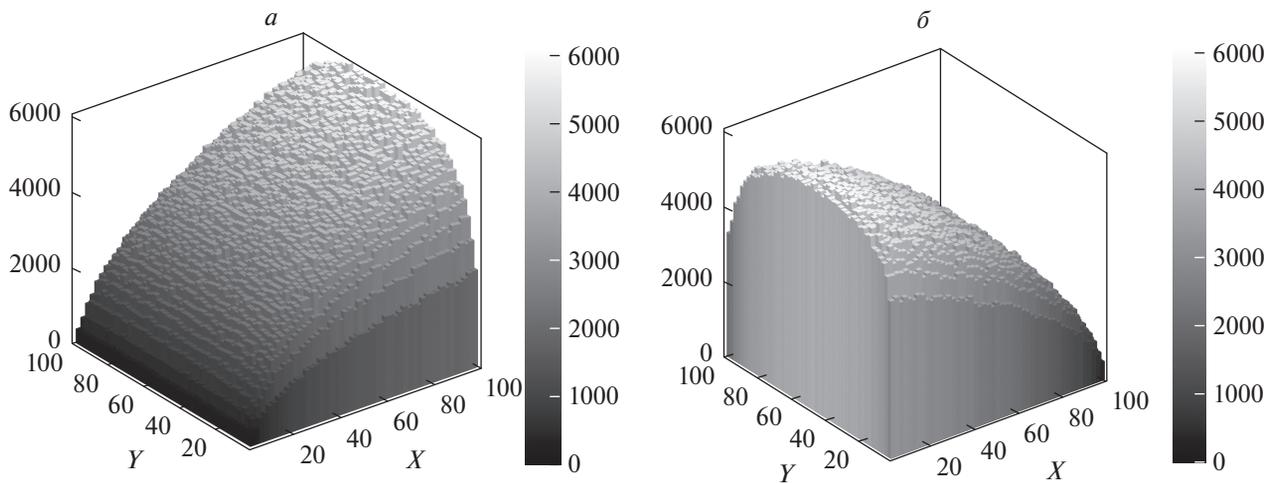


Рис. 3. Распределения фотонов от электронов (а) и позитронов (б) в плоскости SRD $100 \times 100 \text{ см}^2$, расположенного на экваторе. По осям отложены номера сработавших ячеек.

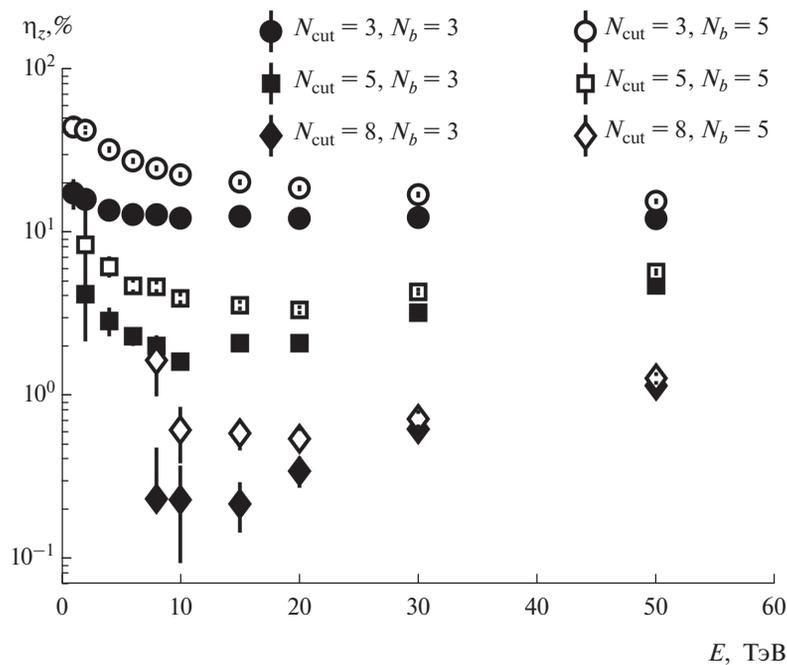


Рис. 4. Зависимость вероятности неверного определения заряда электронов и позитронов от энергии.

ческого фактора детектора с прямоугольной геометрией и расстоянием между С2 и горизонтальным SRD равным 15 см использовались формулы из работы [17]. Площадь SRD принималась равной $2 \times 2 \text{ м}^2$. Рассчитанные энергетические зависимости темпа счета приведены на рис. 5.

Очевидно, что для меньшего значения $N_{\text{cut}} = 2$ ожидаемая статистика больше, чем для $N_{\text{cut}} = 5$, но исходя из рис. 4 видно, что при таком выборе возможна ошибка определения знака заряда при значительном фоне. Также расчеты показали, что темп счета ожидается выше на высокоширотной орбите РОС. Это связано с большей величиной магнитного поля в полярных областях, по сравнению со средними широтами, и, следовательно, с большим значением

интенсивности синхротронного излучения. Поэтому на высоких широтах в детектор в среднем попадает большее количество синхротронных фотонов, чем на низких, что повышает вероятность регистрации. При этом следует учитывать, что реальные фоновые условия в полярных областях Земли могут быть хуже, чем в районах со средними широтами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность регистрации электронов и позитронов ГКЛ по испущенному ими в геомагнитном поле синхротронному излучению.

С помощью компьютерного моделирования Монте-Карло показано, что данная методика может

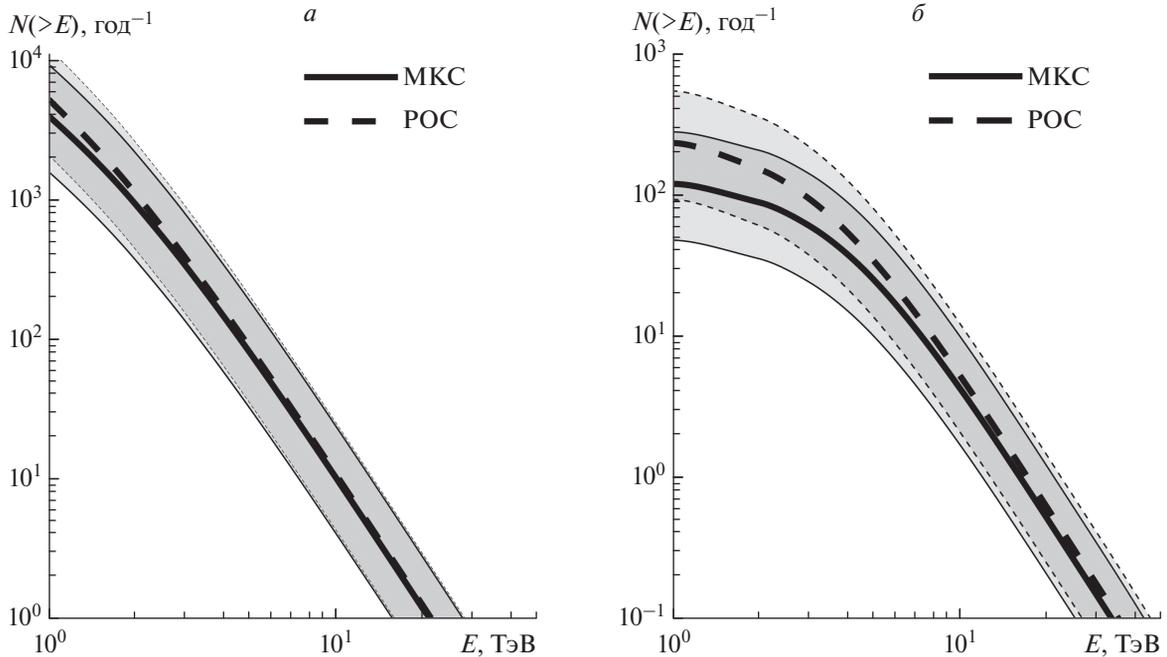


Рис. 5. Энергетическая зависимость интегрального годового темпа счета детектора. $N_{\text{cut}} = 2$ (а) и $N_{\text{cut}} = 5$ (б). Геометрический фактор $\sim 10 \text{ м}^2 \text{ ср}$. Погрешности обозначены закрашенными областями. Они определяются погрешностями существующих экспериментальных данных о потоке $F_{e^-+e^+}$, вносящих основной вклад в ошибку, а также погрешностью моделирования эффективности регистрации.

позволить разделить электронные и позитронные события по их синхротронным фотонам. Рассчитаны ошибки определения заряда частицы при различных соотношениях уровня фона к числу зарегистрированных фотонов. Также проведены оценки годового темпа счета детектора с учетом эффективности SRD. Продемонстрировано, что высокоширотная орбита РОС обеспечивает большую, по сравнению с МКС, статистику.

Методика регистрации электронов и позитронов с помощью их синхротронного излучения в магнитном поле Земли является многообещающей для будущих экспериментов и заслуживает внимания.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей” № FSWU-2023-0068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. A. Aharonian, A. M. Atoyan, and H. J. Volk, *Astron. Astrophys.* **294**, L41 (1995).
2. Y. I. Stozhkov, *Adv. Space Res.* **70**, 2727 (2022).
3. I. V. Moskalenko and A. W. Strong, *Astrophys. J.* **493**, 694 (1998).
4. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaia, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, et al., *Nature* **458**, 607 (2009).
5. M. Aguilar et al. (AMS Collab), *Phys. Rev. Lett.* **122**, 101101 (2019).
6. O. Adriani et al. (CALET Collab), *Phys. Rev. Lett.* **120**, 261102 (2018).
7. G. Ambrosi et al. (DAMPE Collab.), *Nature* **552**, 63 (2017).
8. S. Abdollahi et al. (The Fermi-LAT), *Phys. Rev. D* **95**, 082007 (2017).
9. D. Borla Tridon, P. Colin, L. Cossio, M. Doro, and V. Scalzotto, in *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC2011)*, Beijing, China, 2011, Vol. 6, p. 47.
10. K. Egberts et al. for the H.E.S.S. Collab., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **630**, 36 (2011).
11. Zheng Xiong, Sha Wu, and Huihai He for the LHAASO Collab., in *Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)*, Nagoya, Japan, 2023, p. 315.
12. Andrei Kounine on behalf of the AMS Collab., in *Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)*, Nagoya, Japan, 2023, p. 065.
13. O. F. Prilutskii, *JETP Lett.* **16**, 452 (1972).
14. S. A. Stephens and V. K. Balasubrahmanya, *J. Geophys. Res.* **88**, A10, 7811 (1983).
15. A. P. Stuzhin and V. V. Mikhailov, *Phys. At. Nucl.* **86**, 522 (2023).
16. J. Tang, F. Kislak, and H. Krawczynski, *Astropart. Phys.* **128**, 102563 (2021).
17. G. R. Thomas and D. M. Willis, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **5**, 260 (1972).

THE POSSIBILITY OF DETECTING TeV ELECTRONS AND POSITRONS OF GALACTIC COSMIC RAYS USING THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

A. P. Stuzhin¹⁾, V. V. Mikhailov¹⁾

¹⁾*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

The research of the electron and positron spectrum of galactic cosmic rays is an important task of high-energy astrophysics. The necessity of using new methods of electron and positron registration is caused by insufficient statistical reliability of data from modern experiments in the TeV energy range. In the present work, one of the possible registration methods based on the use of synchrotron radiation of electrons and positrons in the Earth's magnetic field is investigated. Using modeling of trajectories of high-energy electrons, positrons, and synchrotron photons emitted by them, the detector count rate for the ISS and ROS orbit has been estimated. The possibility of separation of electrons and positrons using this method is shown.