

ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ФРАГМЕНТАЦИИ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПАЛЛАСИТАХ

*П. А. Бабаев^a, А. В. Багуля^a, А. Е. Волков^{a,b,c}, С. А. Горбунов^a,
Г. В. Калинина^a, Н. С. Коновалова^{a,d}, Н. М. Ожатьева^{a,d*},
Н. Г. Полухина^{a,d,e}, Ж. Т. Садыков^{a,d}, Н. И. Старков^{a,d}, Е. Н. Старкова^a,
Тан Найнг Со^a, М. М. Чернявский^a, Т. В. Щедрина^{a,d}*

^a Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия

^b Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флёрва
Объединенного института ядерных исследований
141980, Дубна, Московская обл., Россия

^c Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, Россия

^d Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, Москва, Россия

^e Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Россия

Поступила в редакцию 24 ноября 2021 г.,
после переработки 2 декабря 2021 г.
Принята к публикации 3 декабря 2021 г.

Представлены результаты модельных расчетов для оценки эффекта фрагментации при регистрации тяжелых и сверхтяжелых ядер галактических космических лучей в кристаллах оливина из палласитов Марьялахти и Игл Стейшн. Измерение потоков и спектров тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах является чувствительным способом изучения состава и возможных источников космических лучей, процессов, происходящих как в самих источниках, так и в межзвездной среде, а также основой для построения моделей удержания космических лучей в Галактике. Полученная в эксперименте ОЛИМПИА база данных, включающая характеристики 21743 треков, на сегодняшний день является крупнейшей в пределах диапазона зарядов $Z > 55$. Сделанные на основе модельных расчетов оценки фрагментации ядер в палласитах показывают, что влияние этого процесса на полученный зарядовый спектр не существенно.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 100-летию А. Е. Чудакова

DOI: 10.31857/S0044451022040150
EDN: DRJNJD

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение зарядового спектра галактических космических лучей (ГКЛ) в области тяжелых и сверхтяжелых ядер представляет большой интерес

для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики. А. Е. Чудаков как председатель Научного совета РАН по космическим лучам (1980–2000 гг.) всегда активно поддерживал работы по поиску и идентификации природных сверхтяжелых элементов (входящих в состав гипотетического острова стабильности сверхтяжелых элементов [1]). Эту проблему В. Л. Гинзбург, Нобелевский лауреат,

* E-mail: okatevanm@lebedev.ru

включил в свой знаменитый список первостепенных задач современной физики [2].

Целью эксперимента ОЛИМПИА (ОЛИВИНЫ из Метеоритов — Поиск тяжелых и сверхтяжелых Ядер) [3], который реализуют авторы статьи, является поиск и идентификация тяжелых и сверхтяжелых ядер ГКЛ в кристаллах оливинов из железо-каменных метеоритов (палласитов), используемых как трековые детекторы. В ходе проекта ОЛИМПИА осуществляется набор данных о составе тяжелой компоненты космического излучения (ядер с $Z > 55$), оценка величин их потоков и построение статистически обеспеченного зарядового спектра в этой области зарядов [4]. Кристаллы оливина $(Mg_{0.8}Fe_{0.2})_2SiO_4$, входящие в состав метеоритов типа палласитов, за время облучения в космическом пространстве накапливают следы ядер ГКЛ тяжелее железа. Уникальность этих природных детекторов заключается в длительном времени их экспозиции: потоки сверхтяжелых ядер в составе космических лучей необычайно малы, и для того, чтобы получить статистически значимый результат, необходимо либо располагать в космосе установкой гигантской площади, либо обеспечить очень продолжительное время экспозиции. Возраст используемых в настоящей работе палласитов (Marjalahti и Eagle Station) составляет, по различным оценкам, от 30 до 175 млн лет [5].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Налетающая заряженная частица, обладающая зарядом $Z > 26$ и энергией $\sim 0.5\text{--}500$ МэВ/нуклон, в оливине стимулирует изменения его физико-химических свойств в нано- и микроразмерной окрестности своей траектории. Разлет быстрых электронов, генерируемых в результате взаимодействия налетающей частицы с электронной подсистемой материала, и последующие структурно-фазовые изменения приводят к возникновению долгоживущей области повышенной химической активности на расстояниях до 1–5 мкм от траектории тяжелого ядра (см., например, [6]). Эти изменения сохраняются в кристаллах оливина в течение сотен миллионов лет.

Лабораторное химическое травление кристаллов оливина позволяет получить видимые под микроскопом треки ядер и проводить прецизионные измерения параметров этих треков. Коллективом авторов разработана оригинальная методика поиска треков тяжелых частиц ГКЛ и определения их геометрических и динамических параметров при послы-

ном травлении и последующей сошлифовке тонких слоев кристаллов метеоритного оливина [7]. При формировании экспериментальной базы данных фиксируются обнаруженные под микроскопом видимые участки треков ядер с $Z > 40$ (ядра с зарядами $26 < Z < 40$ также оставляют следы в оливинах, но их длины слишком малы для измерений с требуемой точностью, и они используются исключительно для определения глубины залегания кристаллов по отношению к доатмосферной поверхности метеороида по величине их плотности). После измерения параметров обнаруженных участков треков часть кристалла толщиной 50–100 мкм (с точностью до нескольких мкм) удаляется, и процесс обработки поверхности с последующими измерениями повторяется. При обработке кристалла на каждой новой стадии осуществляется поиск как новых треков, так и продолжений участков треков, уже найденных на предыдущем этапе. В последнем случае проводится координатная «сшивка» трека, в результате чего восстанавливается его полная длина L до точки остановки в детекторе. Также измеряется скорость V травления оливина вдоль траектории налетающего ядра. Для определения зарядов ядер по измеренным характеристикам треков в рамках проекта разработано специальное программное обеспечение, основанное на калибровочной зависимости заряда частицы $Z(L, V)$. Калибровка метода была осуществлена в серии облучений оливинов космического и земного происхождения на ускорителях тяжелых ионов [7].

Измерения проводятся на разработанном в ФИАН современном высокотехнологичном измерительном комплексе ПАВИКОМ [8, 9], который обеспечивает высокую точность обработки материала и надежность полученных данных. За время осуществления проекта в общей сложности обнаружено и идентифицировано 28272 треков ядер ГКЛ, из которых 21743 включены в итоговое зарядовое распределение, представленное на рис. 1 в сравнении с результатами ряда крупных экспериментов (HEAO-3 [10–12], ARIEL-6 [13] и UNCRE [14]), проведенных на искусственных спутниках Земли. Как видно на рис. 1, полученный в эксперименте ОЛИМПИА зарядовый спектр повторяет основные особенности спектров из этих экспериментов, например, третий пик γ -процессов ($76 \leq Z \leq 78$). Дополнительный анализ полученных данных показал, что зарядовый спектр, построенный для 6529 (из 28272) ядер, имеет аномальный характер [15], связанный с тем, что они были зарегистрированы в кристаллах, взятых из крупной ячейки

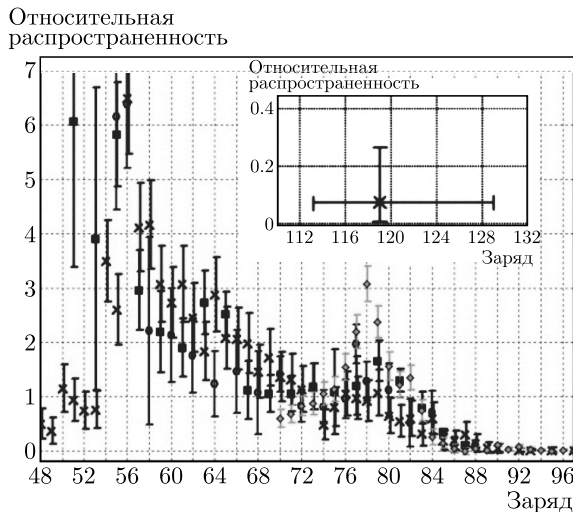


Рис. 1. Зарядовый спектр 21743 ядер галактических космических лучей по результатам различных экспериментов: ОЛИМПИА (кресты), НЕАО-3 (квадраты), ARIEL-6 (ромбы) и UHCRE (круги). Распространенность железа принята равной 10^6

диаметром 5 мм, расположенной близко к поверхности метеорита, и поэтому в данные на рис. 1 не включен. Более близкое расположение кристаллов к поверхности метеорита могло привести к отжигу треков за счет нагревания метеорита при его прохождении через атмосферу во время падения на Землю (см. [16]). При отжиге треков происходит их укорачивание, причем в разной степени, в зависимости от заряда ядра. Этот эффект мог привести к искажениям при определении заряда частиц и, следовательно, к изменению полученного зарядового распределения [17].

3. МОДЕЛЬ ФРАГМЕНТАЦИИ

Кристаллы оливина, используемые в эксперименте ОЛИМПИА, располагаются на глубине нескольких сантиметров от доатмосферной поверхности метеороида. Следовательно, существует вероятность того, что при прохождении слоя метеоритного вещества от этой поверхности до уровня наблюдения ядра космического излучения испытывали неупругие взаимодействия, в результате которых они распадались и образовывали фрагменты с другим зарядом и массой. Такие события могли привести к искажениям полученных данных относительно первичного зарядового спектра ГКЛ.

Чтобы оценить этот эффект и его возможное влияние на полученные результаты, с помощью про-

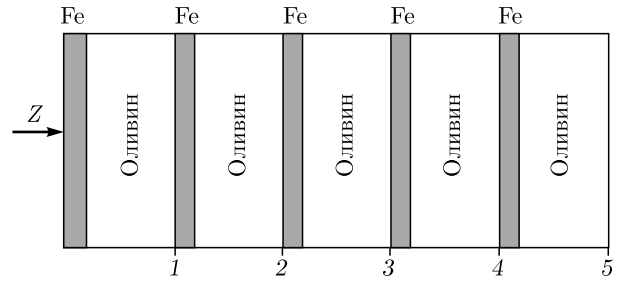


Рис. 2. Схема железо-оливиновой сборки, имитирующей структуру палласита

Таблица

Глубина (номер на рис. 2)	1	2	3	4	5
Энергия налетающего ядра, ГэВ/нуклон	0.8	1.1	1.4	1.7	2
Доля неупругих ядерных событий, %	5	11	20	32	48

граммного пакета GEANT4 [18] было проведено моделирование прохождения тяжелых ядер через железо-оливиновую сборку, имитирующую структуру палласита. Сборка включает чередующиеся слои железа толщиной 1 мм и оливина толщиной 1 см (рис. 2). Такая конфигурация соответствует соотношению объемов железной матрицы и кристаллов оливина в исследуемых фрагментах метеоритов. При моделировании учитывались взаимодействия налетающих ядер с электронными оболочками атомов, а также упругие и неупругие ядерные взаимодействия с ядрами атомов метеорита. Последние могут изменить массу и заряд налетающего ядра или привести к его распаду на осколки.

Моделирование было проведено для ядер урана. Трек, видимый после травления в оптический микроскоп, создают ядра урана с кинетической энергией, меньшей 500 МэВ/нуклон. Для разных глубин этой энергии соответствуют разные величины энергии ядра, входящего в метеорит. Целью моделирования было оценить, какая доля ядер была потеряна за счет фрагментации до входа в слой оливина, находящегося на определенной глубине. Концы рассмотренных слоев на рис. 2 отмечены цифрами 1, 2, 3, 4 и 5. Отметим, что основная часть обработанных кристаллов располагалась на глубине 2–3 см. Каждый сеанс моделирования включал несколько тысяч событий. Результаты моделирования показаны в таблице.

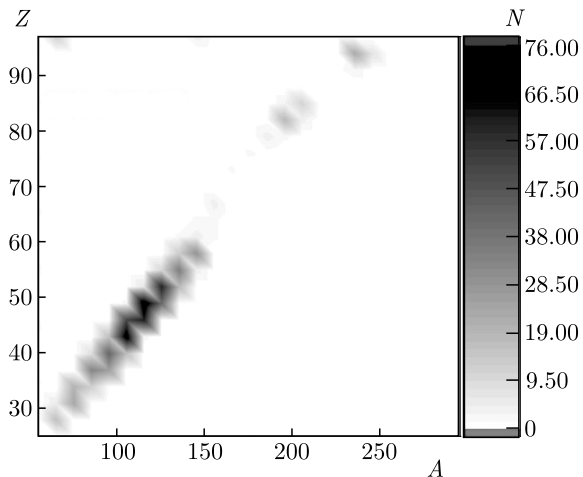


Рис. 3. Распределение по заряду и массе фрагментов, образовавшихся при взаимодействиях ядер урана, полученное при расчетах для глубины 3 на рис. 2

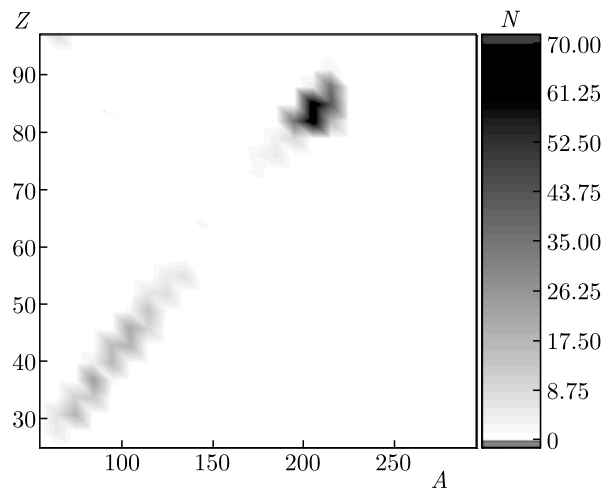


Рис. 5. Распределение по заряду и массе фрагментов, образовавшихся в результате взаимодействий ядер свинца, полученное при расчетах для глубины 3 на рис. 2

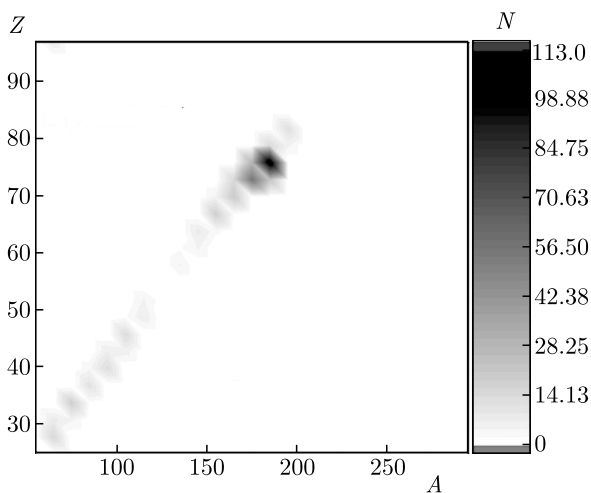


Рис. 4. Распределение по заряду и массе фрагментов, образовавшихся при взаимодействиях ядер вольфрама, полученное при расчетах для глубины 3 на рис. 2

Следует отметить, что, согласно результатам моделирования, неупругие взаимодействия ядер урана при рассмотренной энергии приводят в основном к фрагментации на два тяжелых осколка с зарядами в диапазоне $30 < Z < 60$, в сопровождении легких фрагментов (нуклонов, дейтронов, альфа-частиц). На рис. 3 показано распределение числа фрагментов N по заряду и массе на глубине 3 рис. 2.

Для понимания зависимости полученных результатов от заряда падающих на метеорит ядер было проведено аналогичное моделирование для ядер вольфрама и свинца. При такой же величине пер-

вичной энергии на нуклон доли неупругих взаимодействий у этих ядер близки к значениям, приведенным в таблице, однако характер распределения конечных продуктов совершенно иной. На рис. 4 приведено распределение по заряду и массе фрагментов, образовавшихся при взаимодействиях ядер вольфрама. Видно, что большинство фрагментов составляют ядра, близкие по своим параметрам к исходному ядру, т. е. неупругий процесс идет по каналам перезарядки и подхвата.

Для ядер свинца имеет место промежуточная ситуация (рис. 5).

Следует отметить, что большая часть тяжелых фрагментов урана и свинца имеют заряд меньше $Z = 53$. Это означает, что они выходят за пределы эффективной регистрации ядер рассматриваемой методикой ($Z > 55$), т. е. возникающие неупругие ядерные каналы в этом случае приводят к потере регистрируемых ядер. С другой стороны, часть фрагментов вольфрама и свинца, испытывающих перезарядку или подхват, включаются в общее распределение зарядов и слегка «размывают» его.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Энергетические спектры $F(T)$ галактических космических лучей от протонов до ядер никеля подобны: они имеют максимум в области энергий $T \approx 0.5$ ГэВ/нуклон и убывают по степенному закону как $F \sim T^{-2.7}$ при $T > 1$ ГэВ/нуклон [19].

Поскольку проникающая способность частиц растет с увеличением энергии, это означает, что количество космических ядер в метеорите будет убывать с ростом глубины. Расчет показывает, что если принять, что и сверхтяжелые ядра имеют ту же зависимость, то на глубине с номером 2 на рис. 2 поток будет в 4–5 раз больше, чем на глубине 5. Кроме того, на глубине 2 доля фрагментированных ядер в четыре раза меньше. Кристаллы метеоритного оливина, использованные в данной работе, располагались на относительно небольшой глубине (менее 5–6 см) от доатмосферной поверхности метеороида, причем основная часть обработанных кристаллов располагалась на глубине 2–3 см.

Для наглядности можно провести мысленный эксперимент. Пусть наша сборка облучается ядрами урана с энергией, приведенной в таблице для уровней 2, 3, 4 и 5, при этом каждый раз ядро будет подходить к соответствующему слою оливина с энергией около 500 МэВ/нуклон, позволяющей создавать в нем видимый трек. Если через уровень 2 пройдет 100 ядер, только 89 из них будут зарегистрированы, а 11 фрагментируют. При том же исходном количестве ядер, падающих на сборку, через уровень 3 пройдет порядка 50 ядер, из которых 10 фрагментируют, а 40 будет зарегистрировано. Через четвертый слой оливина пройдет уже около 40 ядер, 12 фрагментируют и, наконец, через пятый слой пройдет 20 ядер, 10 из них фрагментируют. Таким образом, из 210 падающих на сборку ядер, которые могли бы создать в оливине видимый трек, фрагментирует всего 43 ядра, а остальные 167 будут зарегистрированы. При таких условиях потери составляют всего около 20 %, что, по нашему мнению, не может оказать существенного влияния на конечный результат.

Дополнительным аргументом в пользу этого вывода является демонстрация поправок на фрагментацию, сделанных для спутниковых экспериментов, изучавших зарядовые спектры ядер ГКЛ (на примере эксперимента UCHRE [20]). Эксперименты на спутниках имели ту же нижнюю границу по энергии, что и наш эксперимент (~ 1 ГэВ/нуклон), а это подразумевает аналогичные условия фрагментации и, следовательно, аналогичный масштаб поправок, по крайней мере, по порядку величины. Из-за схожих условий фрагментации можно предположить, что соответствующая поправка в эксперименте ОЛИМПИА того же порядка и не повлияет на сравнение со спутниковыми данными. На рис. 6а дано сравнение относительных выходов зарегистрированных ядер в эксперименте UCHRE до и после

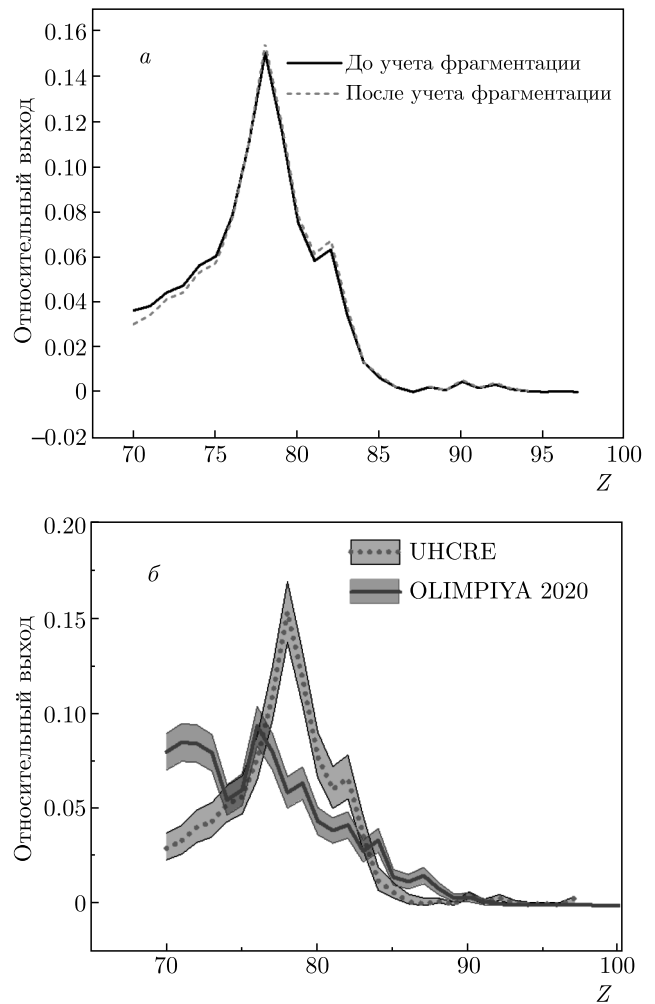


Рис. 6. а) Сравнение результатов спутникового эксперимента UCHRE с учетом фрагментации и без него. б) Сравнение результатов экспериментов UCHRE и ОЛИМПИА с диапазонами поправок на фрагментацию

учета фрагментации, показывающее малое влияние указанных поправок на конечный результат. Рисунок 6б, на котором дано сравнение результатов экспериментов UCHRE и ОЛИМПИА с диапазонами поправок на фрагментацию, подтверждает, что учет этих поправок не влияет на результат сравнения.

Сделанные расчеты позволяют также объяснить наличие в наших данных ядер с зарядами $84 \leq Z \leq 89$. Ядра с зарядами в этом диапазоне не могут содержаться в первичных космических лучах в силу их очень малого времени жизни. Мы полагаем, что регистрация их в нашем эксперименте является результатом фрагментации более тяжелых ядер в доатмосферном слое метеороида [21, 22].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, авторами разработана и успешно используется оригинальная, не имеющая аналогов методика поиска и идентификации тяжелых и сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов, основанная на автоматизированных измерениях параметров их треков. На сегодняшний день в результате реализации эксперимента ОЛИМПИА получено зарядовое распределение тяжелой компоненты ГКЛ для 21743 ядер с зарядами $Z > 55$. Выполненные модельные расчеты процессов фрагментации ядер в веществе метеорита показали, что влияние этого эффекта не изменит принципиальным образом результирующий зарядовый спектр. Можно утверждать, что изучение сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов-палласитов на основе трековой методики дает возможность получать уникальные и достоверные результаты, открывая новые возможности в исследовании потоков и спектров космических лучей в области тяжелых и сверхтяжелых ядер. Полученные результаты, чрезвычайно важные для понимания физической картины мира, представляют большой интерес для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. G. Nilsson, S. G. Thompson, and C. F. Tsang, *Phys. Lett. B* **28**, 458 (1969).
2. В. Л. Гинзбург, *УФН* **169**, 419 (1999).
3. В. Л. Гинзбург, Е. Л. Фейнберг, Н. Г. Полухина и др., *Докл. РАН* **402**, 472 (2005).
4. V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky et al., *Astrophys. J.* **829**, 120 (2016).
5. А. В. Багуля, М. С. Владимиров, А. Е. Волков и др., *Кратк. сообщ. по физике* **42**, 49 (2015).
6. А. М. Митерев, *УФН* **172**, 1131 (2002).
7. А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., *ПТЭ* № 2, 38 (2009).
8. A. Aleksandrov, I. Apacheva, E. Feinberg et al., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **535**, 542 (2004).
9. A. Alexandrov, N. Konvalova, N. Okateva et al., *Measurement* **187**, 110244 (2022).
10. М. Н. Израил, *17th Int. Cosmic Ray Conf., Conf. Papers* **12**, 53 (1981).
11. W. Binns, M. Israel, N. Brewster et al., *Astrophys. J.* **297**, 111 (1985).
12. W. Binns, T. Garrard, P. Gibner et al., *Astrophys. J.* **346**, 997 (1989).
13. P. Fowler, R. Walker, M. Mashedier et al., *Astrophys. J.* **314**, 739 (1987).
14. J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan et al., *Astrophys. J.* **747**, 40 (2012).
15. А. В. Александров, А. В. Багуля, А. Е. Волков et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **47**(12), 381 (2020).
16. В. П. Перельгин, Л. Л. Кашкарова, *Метеоритика* **38**, 55 (1979).
17. Than Naing Soe, N. G. Polukhina, and N. I. Starkov, *Phys. Atom. Nucl.* **84**, 643 (2021).
18. J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis et al., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **835**, 186 (2016).
19. J. S. George, K. A. Lave, M. E. Wiedenbeck, W. R. Binns et al., *Astrophys. J.* **698**, 1666 (2009).
20. J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan et al., *Astrophys. J.* **747**, 40 (2012).
21. А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., *УФН* **180**, 839 (2010).
22. А. В. Багуля, Л. Л. Кашкаров, Н. С. Коновалова и др., *Письма в ЖЭТФ* **97**, 811 (2013).