

## МЮОННАЯ РАДИОГРАФИЯ КРУПНЫХ ПРИРОДНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ — НОВЫЙ ЭТАП В МЕТОДИКЕ ЯДЕРНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ

*А. Б. Александров<sup>а</sup>, С. Г. Васина<sup>а,б</sup>, В. И. Галкин<sup>с</sup>, В. М. Грачев<sup>д</sup>, А. С. Коновалов<sup>е</sup>,  
Н. С. Коновалова<sup>а</sup>, П. С. Королев<sup>ф</sup>, А. А. Ларионов<sup>ф</sup>, А. К. Манагадзе<sup>г</sup>,  
И. А. Мельниченко<sup>г</sup>, Н. М. Окатьева<sup>а</sup>, Н. Г. Полухина<sup>а,д,г</sup>, Т. М. Роганова<sup>г</sup>,  
Ж. Т. Садыков<sup>г</sup>, Н. И. Старков<sup>а</sup>, Е. Н. Старкова<sup>а</sup>, В. Э. Тюков<sup>а</sup>,  
М. М. Чернявский<sup>а</sup>, В. И. Шевченко<sup>д</sup>, Т. В. Щедрина<sup>а\*</sup>*

<sup>а</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований  
141980, Дубна, Московская обл., Россия

<sup>с</sup> Московский государственный университет им. М. М. Ломоносова  
119991, Москва, Россия

<sup>д</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
115409, Москва, Россия

<sup>е</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе  
117997, Москва, Россия

<sup>ф</sup> Московская духовная академия Русской православной церкви  
141300, Сергиев Посад, Московская обл., Россия

<sup>г</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского университета им. М. М. Ломоносова  
119991, Москва, Россия

<sup>г</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
119049, Москва, Россия

Поступила в редакцию 3 декабря 2021 г.,  
после переработки 13 декабря 2021 г.  
Принята к публикации 13 декабря 2021 г.

Представлено новое исследование исторического объекта на территории Российской Федерации, Свято-Троицкого Данилова монастыря, проведенное методом мюонной радиографии. В основе метода лежит регистрация изменений потоков мюонов космического происхождения при прохождении изучаемого объекта. В качестве экспериментального оборудования использованы ядерные фотоэмульсии, обладающие уникальным пространственным и угловым разрешением и имеющие широчайший диапазон применений в экспериментальной ядерной физике. Эксперимент демонстрирует высокую эффективность метода при поиске скрытых объектов, наличие которых на территории монастыря подтверждается полученными результатами.

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

DOI: 10.31857/S0044451022040137  
EDN: DQUAEP

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальной ядерной физике и физике элементарных частиц давно и успешно исполь-

\* E-mail: tvshchedrina@gmail.com

зуются трековые детекторы различных типов, что связано с их уникальным пространственным разрешением, возможностью разделения треков частиц, наглядностью и достоверностью регистрации пространственной картины взаимодействий. В развитии ядерной физики трековые детекторы сыграли выдающуюся роль, что подтверждается целой серией Нобелевских премий (1903 — А. Беккерель, 1927 — Ч. Вильсон, 1936 — В. Гесс, 1950 — С. В. Пауэлл, 1960 — Д. Глезер, 1968 — Л. Альварес, 1992 — Ж. Шарпак и т. д.)

Трековые детекторы, в силу простоты их конструкции, имеют очень широкий диапазон использования: они экспонируются на ускорителях [1, 2], в стратосфере [3, 4], в условиях высокогорья [5] и в подземных низкофоновых лабораториях [6]. Так, с помощью трековых детекторов на основе ядерных фотоэмульсий в подземных лабораториях глубокого размещения впервые наблюдались распад протона, двойной бета-распад, потоки солнечных нейтрино. Среди открытий в области физики космических лучей, сделанных с применением ядерных фотоэмульсий, необходимо отметить первые экспериментальные подтверждения существования пиона, антипротона и тяжелых мезонов, а также обнаружение в составе космических лучей ядер тяжелее протона [7, 8]. Одним из самых резонансных экспериментов на основе ядерно-эмульсионных трековых детекторов стало обнаружение в 2016 г. ранее не известной крупной камеры в теле пирамиды Хеопса [9]. «Просвечивание» пирамиды осуществлялось методом мюонной радиографии с использованием релятивистских мюонов космического происхождения.

С помощью ядерных фотоэмульсий был обнаружен эффект уменьшения ионизационных потерь для узких электрон-позитронных пар (так называемый «эффект Чудакова»), который состоит в том, что различные по знаку электромагнитные поля близко идущих компонент электрон-позитронной пары высокой энергии (выше нескольких сотен гигаэлектронвольт) частично компенсируют друг друга [10]. При таких энергиях угол разлета электрона и позитрона мал настолько, что начало следов пары в фотоэмульсии выглядит как трек одной частицы с пониженной ионизирующей способностью, т. е. ионизация, производимая совместно двумя релятивистскими заряженными частицами, оказывается меньше, чем минимальная ионизация, вызванная одной из них.

Ядерная фотоэмульсия является одним из наиболее востребованных в настоящее время трековых

детекторов. Она состоит из кристаллов галогенида серебра, равномерно распределенных в желатиновой основе. Каждый кристалл действует как независимый детектор заряженных частиц, формируя в результате ионизации скрытое изображение, которое становится видимым под оптическим микроскопом после химического проявления [11]. Следы заряженных частиц в ядерной фотоэмульсии выглядят как цепочки проявленных зерен, причем геометрические параметры трека зависят от заряда и скорости зарегистрированной частицы. В экспериментах этот материал используется в виде эмульсионных пленок, где слои фотоэмульсии толщиной в несколько десятков микрон наносятся с двух сторон на тонкую синтетическую основу.

Ядерно-эмульсионные детекторы представляют собой стопки двусторонних эмульсионных пленок, площадь которых определяется требованиями эксперимента. Единственным на данный момент производителем ядерных фотоэмульсий в России является компания ОАО «Славич», где производятся эмульсионный гель и эмульсионные пленки, отвечающие мировым требованиям качества. На предприятии «Славич», в сотрудничестве с авторами статьи, разрабатываются новые типы фотоэмульсий с самым широким диапазоном параметров.

На начальном этапе развития ядерно-эмульсионной методики определение ионизации, создаваемой заряженной частицей в фотоэмульсии, осуществлялось путем измерения плотности почернения следа методом фотометрирования. Для этой цели были созданы специальные приборы — фотометры [12–15], позволявшие определять общее почернение следа. По измеренному относительному почернению и длине следа определялись заряд и скорость частицы, а в совокупности с остаточным пробегом или многократным рассеянием — и ее масса [16].

В настоящее время развитие технологий производства ядерных фотоэмульсий различной чувствительности и прогресс автоматизированной сканирующей техники на основе программируемых микроскопов [17, 18] позволяют подойти к решению таких сложнейших экспериментальных задач, как прямая регистрация частиц темной материи [19].

Настоящая статья дает представление о современном уровне развития ядерно-эмульсионной методики в России на примере одного из экспериментов, осуществляемых авторами по методу мюонной радиографии.

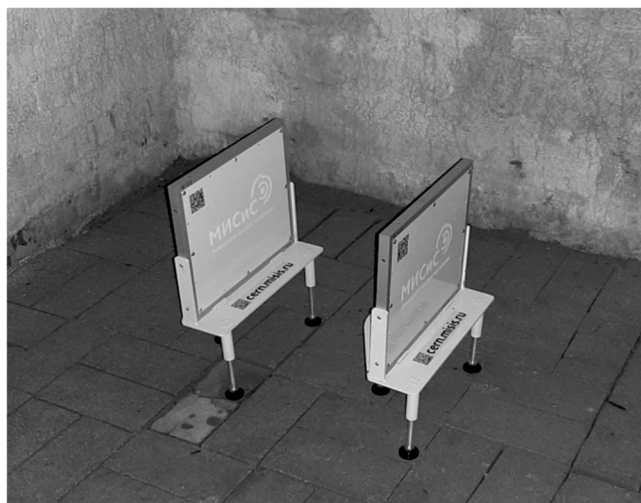


Рис. 1. Ядерно-эмульсионные детекторы, установленные в подвальном помещении одной из церквей Свято-Троицкого Данилова монастыря

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Высокая интенсивность у поверхности Земли потоков слабозаимодействующих атмосферных мюонов с большой проникающей способностью дает возможность изучать крупные природные и промышленные объекты методом мюонной радиографии и получать 3D-изображения их внутренней структуры, подобно рентгеновскому снимку [20]. Проходя через области с разной плотностью вещества и испытывая при этом разную степень поглощения, потоки заряженных мюонов несут информацию об особенностях внутреннего строения объектов, сквозь которые они прошли. Аномалии угловых распределений треков зарегистрированных частиц могут указывать на наличие в определенном направлении областей, отличающихся по плотности от основного вещества (пустот или инородных включений). Для получения этой информации достаточно иметь детектор, регистрирующий угловое распределение заряженных частиц в широком диапазоне углов.

На протяжении нескольких лет авторы проводят исследования методом мюонной радиографии с использованием ядерно-эмульсионных детекторов, в том числе для изучения исторических памятников на территории России [21, 22]. В настоящее время осуществляется эксперимент по поиску скрытых под землей помещений и фрагментов зданий Свято-Троицкого Данилова монастыря в Переславле-Залесском Ярославской области [23].

Согласно методике эксперимента, слои ядерной фотоэмульсии, упакованные в светонепроницаемые

пакеты, фиксируются в вертикальном положении с помощью металлических конструкций, разработанных в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» (рис. 1). Представленный на рис. 1 детектор состоял из четырех эмульсионных модулей размером  $10 \times 12.5 \text{ см}^2$ , по 5 слоев в каждом, итого наполнение одного детектора составило 20 эмульсионных слоев. Стопки слоев ядерной фотоэмульсии регистрируют треки падающих атмосферных мюонов, позволяя сравнивать между собой плотности потоков этих частиц, проходящих с разных направлений, и определять их угловые характеристики. Пространственное разрешение двусторонней фотоэмульсии при восстановлении трека мюона составляет 2–3 мкм, угловое разрешение порядка 1 мр.

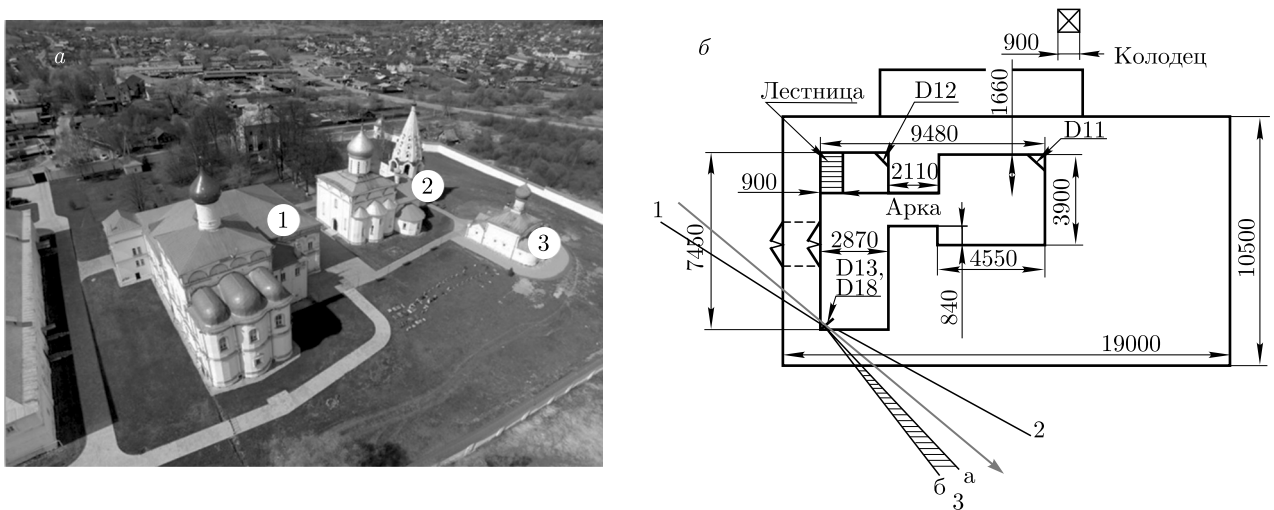
В данной работе представлены последние результаты зондирования некоторых областей подземного пространства монастыря в окрестности церкви Всех Святых (рис. 2а). На рис. 2б показана схема установки ядерно-эмульсионных детекторов D11, D12, D13 и D18 в подвальном помещении церкви.

Детекторы направлены таким образом, чтобы увидеть старый фундамент (D11, D12), если он был и сохранился, и увидеть территорию между церквями 1 и 3 (D13 и D18) — возможные захоронения, остатки подземного перехода, использовавшегося ранее для отопления церкви Всех Святых.

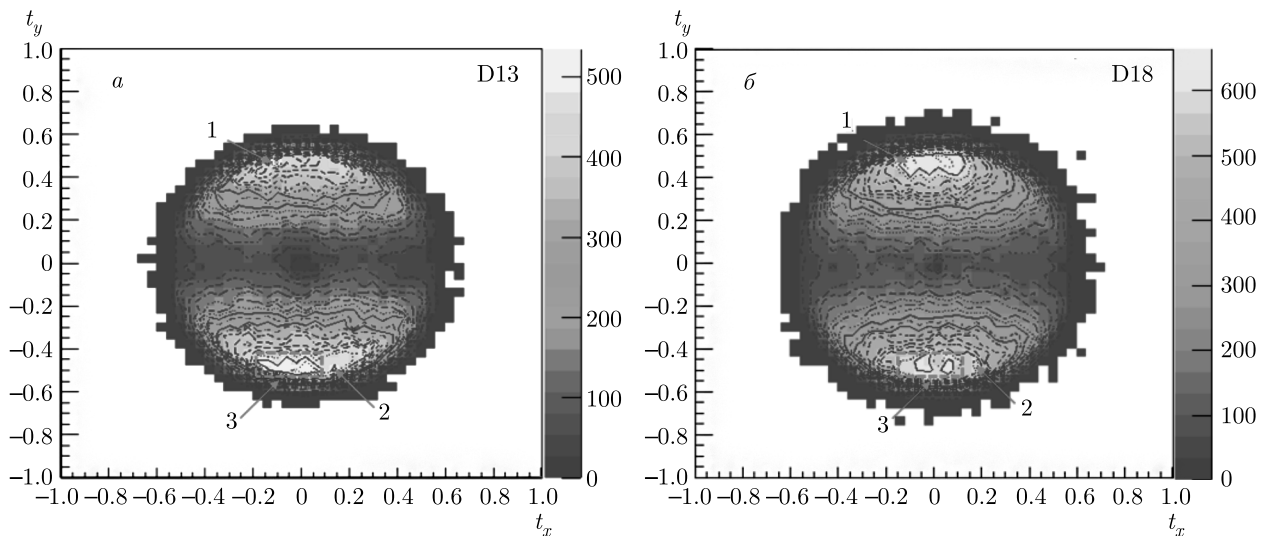
Как показали ранее проведенные тестовые эксперименты [24, 25], для получения статистически обеспеченных угловых распределений в подобных условиях наблюдений продолжительность экспозиции детекторов должна составлять не менее двух месяцев. После завершения экспозиции детекторы демонтируются, ядерная фотоэмульсия подвергается процедуре проявки в химической лаборатории ОАО «Славич». Сканирование проявленных пленок, измерение параметров треков частиц и первичный анализ данных осуществляются с помощью автоматизированного микроскопа, входящего в состав многофункционального комплекса по обработке данных трековых детекторов ПАВИКОМ [26]. В дальнейшем анализе используются измеренные угловые характеристики треков  $t_x$  и  $t_y$ , связанные с углами  $\varphi$  и  $\theta$  траекторий частиц относительно нормали к плоскости детектора:

$$t_x = \frac{dx}{dz} = \text{tg } \theta \cos \varphi,$$

$$t_y = \frac{dy}{dz} = \text{tg } \theta \sin \varphi.$$



**Рис. 2.** (В цвете онлайн) *а*) Храмовый комплекс монастыря (1 — церковь Похвалы Божией Матери, 2 — собор Троицы Живоначальной с церковью преп. Даниила, 3 — церковь Всех Святых). *б*) Схема расположения детекторов D11, D12, D13 и D18 в подвальном помещении церкви Всех Святых. Направления 1, 2 и 3 показывают направления обнаруженных особенностей потоков мюонов, обсуждение которых приводится в статье



**Рис. 3.** (В цвете онлайн) Угловые распределения экспериментальных данных для детекторов D13 (*а*) и D18 (*б*) в здании 3. Цветовая шкала на гистограмме обозначает число зарегистрированных мюонов в единице бина. По оси ординат  $t_y > 0$  соответствует направлению назад (верхняя полусфера), а  $t_y < 0$  — направлению вперед

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детекторы D13 и D18 были установлены последовательно друг за другом в подвальном помещении здания церкви Всех Святых, но с одним и тем же временем экспозиции около 2.5 мес. Оба детектора располагались приблизительно в одном и том же месте, схема их расположения представлена схематично на рис. 2б. Так как оба детектора использовались для экспериментального исследования одного и того

же объекта в идентичных условиях, наличие структурных особенностей в полученных данных обоих детекторов отражает реальные структуры изучаемого объекта. Реконструкция данных для детекторов D13 и D18 в виде распределения числа мюонов в переменных  $t_x$ ,  $t_y$  представлена на рис. 3.

Основная часть широких пиков при  $t_x = 0$ ,  $t_y = \pm 0.5$  соответствует естественному распределению потоков мюонов в данных диапазонах углов

( $\theta < 45^\circ$ ). Однако на этом фоне присутствуют дополнительные локальные максимумы (их положения обозначены цифрами 1, 2, 3 на рис. 3):

1) неоднородность по направлению «назад» при  $t_y = 0.45$ ,  $t_x = -0.1$ ;

2) неоднородность по направлению «вперед» при  $t_y = -0.5$ ,  $t_x = 0.18$ ;

3) широкая неоднородность по направлению «вперед» при  $t_y = -0.5$ ,  $t_x$  от  $-0.2$  до  $0.1$ .

Наличие перечисленных максимумов указывает на то, что в этих направлениях присутствуют области с меньшей поглощающей способностью. С учетом того, что значения переменной  $t_y = \pm 0.5$  соответствуют углу к горизонту порядка  $20-25^\circ$ , эти особенности находятся на расстоянии не более  $7-8$  м по горизонтали от положения детектора.

Обсудим каждую из обнаруженных особенностей по отдельности.

Максимуму под номером 1 по направлению «назад» может соответствовать объект небольшого размера — полость или область с плотностью, меньшей чем плотность основного материала (грунт, стены и т. п.).

Максимум под номером 2 по направлению «вперед» с большой долей вероятности соответствует дверному проему, ведущему в келью между подвалом и первым этажом.

Области вблизи  $t_x = 0$  соответствуют естественному максимуму потока мюонов при фиксированном  $t_y$  и в первом приближении должны быть одинаковы в направлении вперед и назад. Однако в направлении вперед при  $t_y = -0.5$  видна широкая неоднородность, обозначенная номером 3, намного превышающая естественный фон. Ее большой угловой размер может отражать большие линейные размеры, величина которых зависит от расстояния до детектора и может быть оценена по сектору а-б на рис. 2б.

С учетом угла к горизонту  $20-25^\circ$  радиус видимости детектора составляет  $6-8$  м. Для удобства восприятия на рис. 4 представлено изображение карты местности и приведены направления структурных особенностей 1, 2, 3 и область видимости в виде круга при глубине подвала  $3$  м относительно уровня земли.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, как показывают проведенные в Свято-Троицком Даниловом монастыре эксперименты, метод мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов является перспективным альтернативным методом зондирования

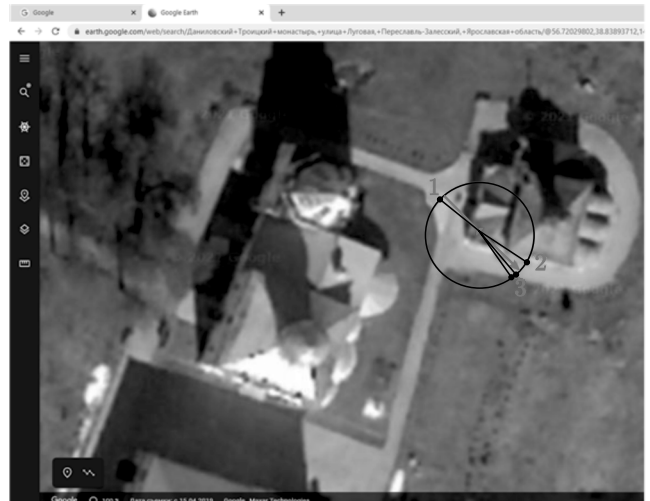


Рис. 4. Карта местности, сделанная при помощи снимка GooglePro. Круг обозначает радиус видимости детектора, цифрами 1, 2, 3 обозначены направления обнаруженных структурных особенностей в экспериментальном угловом распределении мюонов

крупномасштабных геологических и промышленных объектов. Эмульсионные детекторы обладают рядом неоспоримых преимуществ, к которым относятся высокое пространственное (менее  $1$  мкм) и угловое (около  $1$  мср) разрешение, большая информационная емкость, небольшие размеры ( $1$  м<sup>2</sup> и менее), удобство транспортировки и простота эксплуатации в сложных условиях.

Уникальность метода мюонной радиографии на основе использования эмульсионных трековых детекторов состоит в том, что он позволяет осуществлять диагностику самых разнообразных природных и промышленных объектов с использованием экономичных и компактных детекторов достаточно простой конструкции, что выгодно отличает его от более затратных альтернативных методов. Возросший интерес к методу мюонной радиографии определен стремительным развитием прецизионной сканирующей техники, позволяющей обрабатывать большие площади релятивистской эмульсии в сравнительно короткие сроки.

Представленные в статье авторские методические подходы и прототипы технических решений по реализации метода мюонной радиографии с использованием эмульсионных трековых детекторов в приложении к исследованию состояния объекта культурного наследия ЮНЕСКО, проведенный анализ результатов экспериментальных исследований имеют огромное значение с точки зрения дальнейших перспектив внедрения метода в России.

## ЛИТЕРАТУРА

1. T. Nakamura, A. Ariga, T. Ban et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **556**, 80 (2006).
2. C. Ahdida, R. Albanese, A. Alexandrov et al., JINST **14**, P03025 (2019).
3. Н. А. Добротин, К. А. Котельников, А. В. Апанасенко и др., Изв. АН СССР, сер. физ. **53**, 250 (1989).
4. Г. Т. Зацепин, С. И. Никольский, И. В. Ракобольская и др., Изв. АН СССР, сер. физ. **61**, 1186 (1997).
5. V. Tioukov, A. Alexandrov, C. Bozza et al., Sci. Rep. **9**, 6695 (2019).
6. N. Agafonova, A. Aleksandrov, A. Anokhina et al., J. Phys. Conf. Ser. **869**, 012048 (2017).
7. С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс, *Исследование элементарных частиц фотографическим методом*, Изд-во иностр. лит., Москва (1962).
8. Д. Перкинс, *Введение в физику высоких энергий*, Мир, Москва (1975), сс. 85–88.
9. K. Morishima, M. Kuno, A. Nishio et al., Nature **552**, 386 (2017).
10. А. Е. Чудаков, Изв. АН СССР, сер. физ. **19**, 651 (1955).
11. A. Ariga, T. Ariga, G. De Lellis et al., in *Particle Physics Reference Library*, Vol. 2: *Detectors for Particles and Radiations*, Springer (2020), pp. 383–438.
12. S. Friesen and K. Kristiansson, Nature **16**, 686 (1950).
13. K. Kristiansson, Phil. Mag. **44**, 268 (1953).
14. S. Friesen and L. Stigmark, Ark. Fysik **8**, 121 (1954).
15. S. Friesen, Ark. Fysik **8**, 305 (1953).
16. Б. А. Войковский, А. И. Галактионов, М. И. Третьякова и др., ПТЭ № 6, 38 (1957).
17. A. Alexandrov, A. Buonauro, L. Consiglio et al., JINST **11**, P06002 (2016).
18. A. Alexandrov, G. De Lellis, and V. Tioukov, Sci. Rep. **9**, (2019).
19. N. Agafonova, A. Aleksandrov, A. Anokhina et al., Eur. Phys. J. C **78**, 578 (2018).
20. А. Б. Александров, М. С. Владимиров, В. И. Галкин и др., УФН **187**, 1375 (2017).
21. S. A. Baklagin, V. M. Grachev, N. S. Konovalova et al., IJRSET **5**, 0507027 (2016).
22. A. Abiev, A. Bagulya, M. Chernyavsky et al., Appl. Sci. **9**, 2040 (2019).
23. А. Б. Александров, С. Г. Васина, В. И. Галкин и др., ЯФ **84**, 496 (2021).
24. А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., Письма в ЭЧАЯ **12**, 1100 (2015).
25. А. В. Aleksandrov, A. V. Bagulya, M. M. Chernyavsky et al., AIP Conf. Proc. **1702**, 110002 (2015).
26. A. Alexandrov, N. Konovalova, N. Okateva et al., Measurement **187**, 110244 (2022).