12

Модернизация первичного триггера детектора КМД-3

© *А.О. Горковенко*[1,2], *Д.Н. Григорьев*[1,3], *А.Н. Козырев*[1–3], *В.Г. Петроченко*[1], *А.А. Рубан*[1,2], *А.А. Талышев*[1,2], *Д.В. Шёлковый*[4], *Л.Б. Эпштейн*[1–3], *Ю.В. Юдин*[1,2]

[1] Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
[2] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
[3] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия
[4] Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь
E-mail: A.O.Gorkovenko@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 1 сентября 2025 г.
В окончательной редакции 21 октября 2025 г.
Принято к публикации 1 ноября 2025 г.

Представлены описание триггерной системы детектора КМД-3 и результаты ее модернизации для использования в экспериментах на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. Рассмотрены принципы работы и архитектура существующей системы. Создан новый блок принятия решений, реализующий усовершенствованные алгоритмы отбора полезных событий, который увеличил быстродействие системы без потери эффективности регистрации событий. Новый блок на протяжении года успешно эксплуатировался в эксперименте и позволил набрать интегральную светимость более $50\,\mathrm{pb}^{-1}$. Показана возможность увеличения точности исследования редких многофотонных процессов, а также перспектива изучения недоступных в настоящее время событий двухфотонного рождения.

Ключевые слова: триггерная система, алгоритмы обработки данных.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.05.62328.20487

Начиная с 2010 г. в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера проводятся эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000, имеющем рекордную светимость в диапазоне энергий от 320 до 2000 MeV в системе центра масс [1]. Эксперименты на коллайдере ВЭПП-2000 проводятся с участием двух детекторов: сферический нейтральный детектор и криогенный магнитный детектор (КМД-3) [2]. Одной из основных задач детектора КМД-3 является прецизионное измерение сечений рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции. Детектор КМД-3 — это уникальная установка, сочетающая в себе свойства магнитного спектрометра и калориметра с высоким энергетическим и пространственным разрешением. Сбор данных и контроль параметров подсистем детектора осуществляются с помощью системы сбора данных (ССД), обслуживающей около 15 000 измерительных каналов электроники. За своевременную запись данных со всех подсистем детектора отвечает триггерная система, которая осуществляет непрерывный анализ данных на наличие признаков события с подсистем детектора, а в случае обнаружения полезного события формирует сигнал запуска.

Для проведения прецизионных экспериментов на детекторе КМД-3 была разработана комплексная система электроники. Эта система включает в себя общую архитектуру блоков электроники, протоколы связи между ними. Особое внимание уделено временны́м свойствам ССД: синхронизации запусков измерений, сбора и передачи данных, а также контролю надежности и эффективности электроники в целом. Для этого был специально разработан канал связи для передачи сигналов синхронизации и данных — C-Link [3]. Логически ССД можно условно разделить на несколько функциональных уровней (рис. 1), задачи которых существенно различны: регистрирующая электроника, первичный триггер (ПТ, L-1 trigger) и служебная электроника. В регистрирующей электронике происходят усиление и аналоговая обработка сигналов от физических подсистем детектора, преобразование их в цифровую форму и подготовка данных к отправке в построитель события.

Основная задача первичного триггера — это формирование решения о регистрации текущего события в детекторе и своевременный (с задержкой не более $2\,\mu\mathrm{s}$) запуск процесса измерения и записи данных всеми подсистемами детектора. Для ускорения работы ПТ объем обрабатываемой информации уменьшается объединением в регистрирующей электронике сигналов нескольких каналов подсистем детектора в триггерные группы. Подготовка триггерных данных для дальнейшего анализа происходит в интерфейсных блоках первичного триггера. Задача решающих блоков — эффективный поиск полезных событий на основе информации о сработавших триггерных группах с минимально возможным временем обработки и принятие решения о запуске детектора. Алгоритмы работы решающих блоков реализованы на ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы), что обеспечивает минимальное время обработки благодаря параллельным вычислениям, а также дополнительные сервисные возможности.

Логически первичный триггер можно разделить на две части: „заряженный“ и „нейтральный“. Заряженный

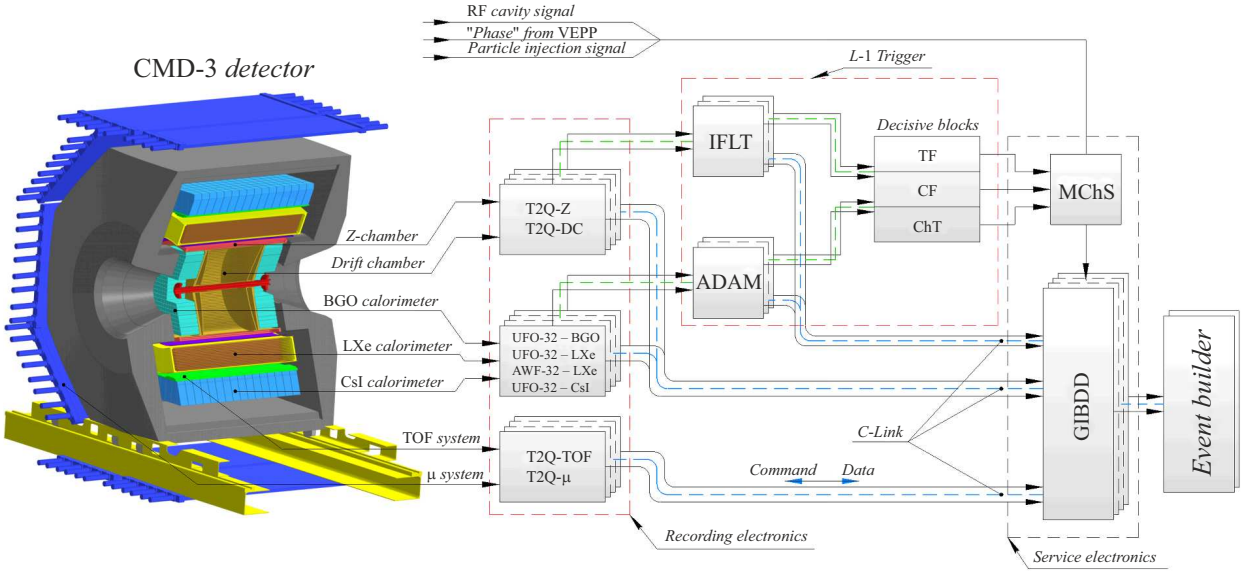


Рис. 1. Система сбора данных детектора КМД-3.

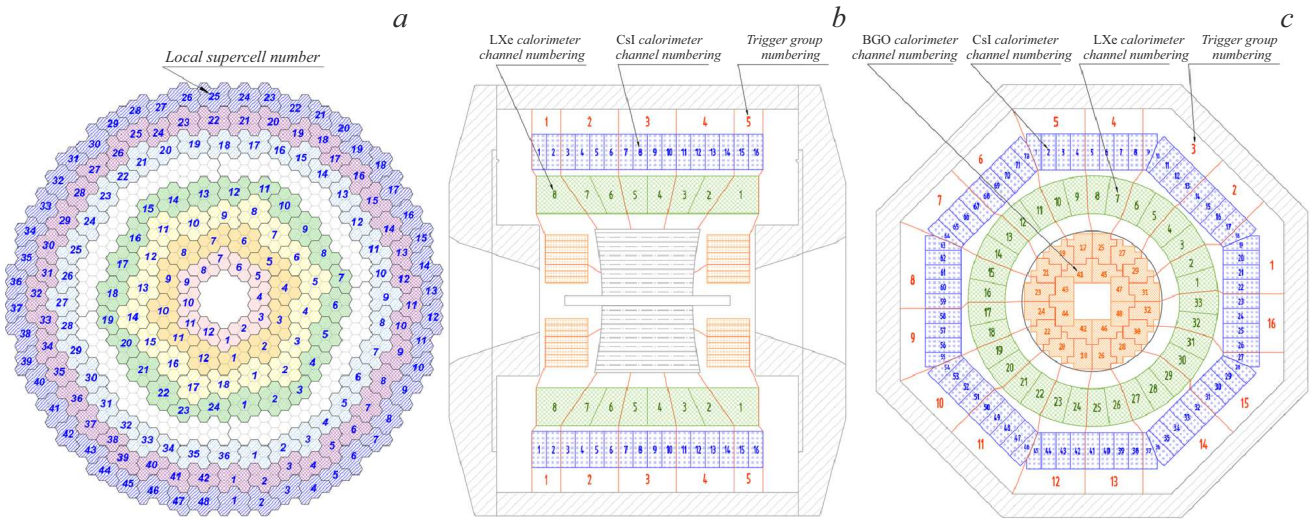


Рис. 2. Схема разбиения дрейфовой камеры (a) и калориметров (b, c) на триггерные группы.

триггер обрабатывает информацию с дрейфовой камеры [4], а нейтральный — с калориметров детектора [5].

Входной информацией для заряженного триггера являются срабатывания 192 триггерных групп, которые объединены в восемь слоев, как показано на рис. 2, a. Решающий блок заряженного триггера, трек-файндер (TF), производит поиск треков заряженных частиц во временны́х срезах, соответствующих каждому обороту пучка в ВЭПП-2000. Алгоритм поиска треков основан на переборе заранее подготовленных трековых масок (шаблоны траекторий). Если сработавшие триггерные группы совпадают хотя бы с одной маской, то трек считается обнаруженным, а такое событие — полезным.

Калориметр регистрирует нейтральные и заряженные частицы по энерговыделению в тяжелом веществе. Калориметр КМД-3 состоит из трех частей: цилиндрический внутренний жидкостный LXe-калориметр, цилиндрический внешний кристаллический CsI-калориметр, торцевой (с двух сторон) кристаллический BGO-калориметр. Каждый цилиндрический калориметр разделен на 80 триггерных групп: 16 групп по азимутальному углу и 5 групп в продольном направлении. Торцевой калориметр с каждой стороны разделен на 24 группы: 16 групп — внешнее кольцо, 8 групп — внутреннее кольцо. Из-за большой загрузки внутреннее кольцо используется только для оперативного измерения светимости. Разбиение калориметров на триггерные группы про-

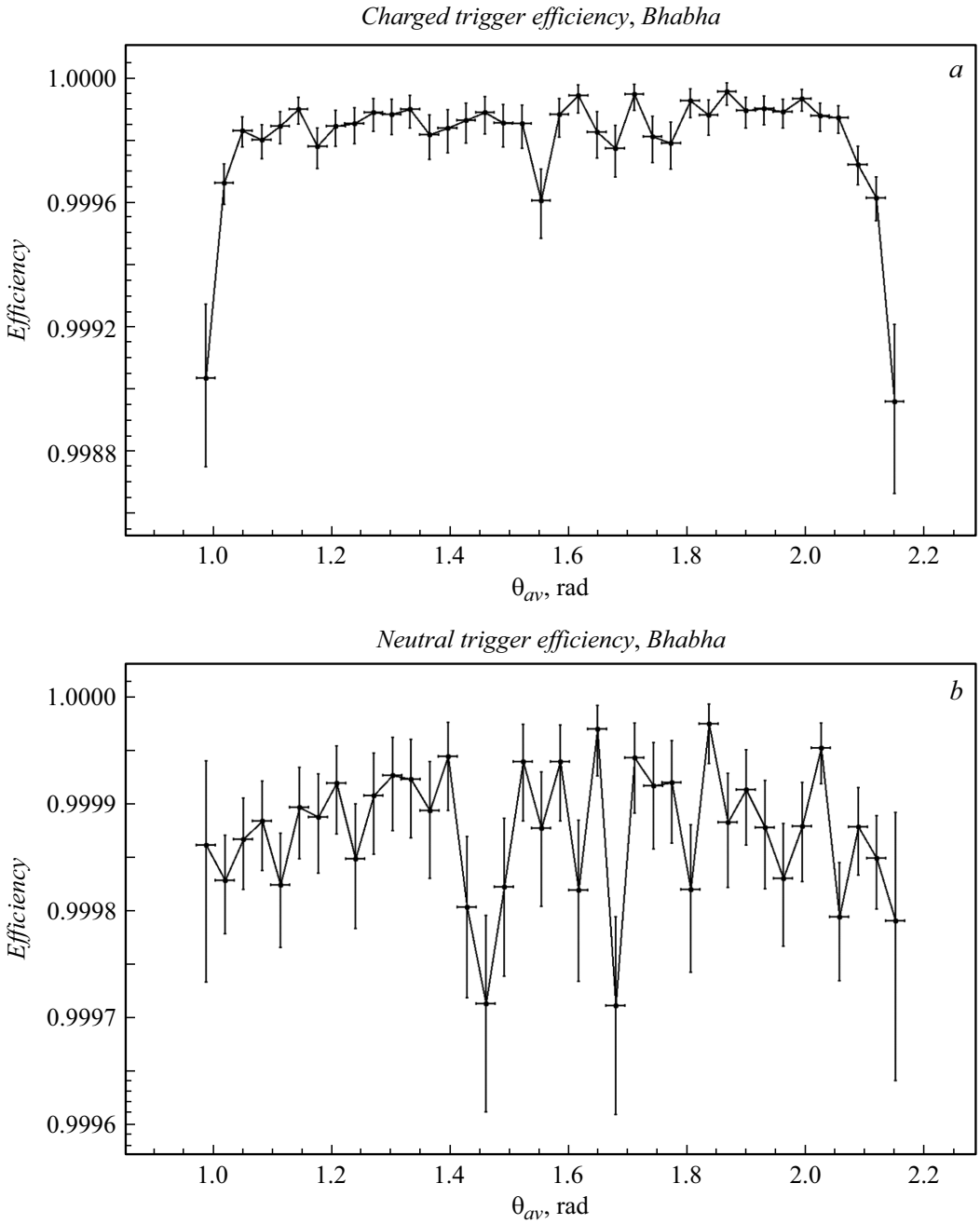


Рис. 3. Эффективности заряженного (a) и нейтрального (b) триггеров.

исходит в соответствии с картой триггерных групп, приведенной на рис. 2, *b*, *c*. Сигналы триггерных групп формируются при помощи аналогового суммирования сигналов с соответствующих каналов калориметров. Аналоговые сигналы поступают в блоки АДИС (ADAM), которые их оцифровывают, измеряют энергию и передают в решающий блок информацию о сработавших триггерных группах на каждый оборот пучка. Решающий блок нейтрального триггера, кластерфайндер (CF), формирует признаки, которые характеризуют текущее событие. Так как частицы в калориметрах вызывают срабатывания в нескольких триггерных группах, на первом этапе формируются группы соседствующих по граням или по углам сработавших триггерных ячеек (кластеры). Алгоритм поиска кластеров находит их количество, взаимное расположение и размер. В ходе своей работы алгоритм применяет булевы операции к строкам и столбцам карты сработавших триггерных групп. На основе информации о кластерах кластерфайндер формирует 45 различных признаков события на каждый оборот пучка.

Одной из ключевых характеристик работы первичного триггера является эффективность регистрации полезных

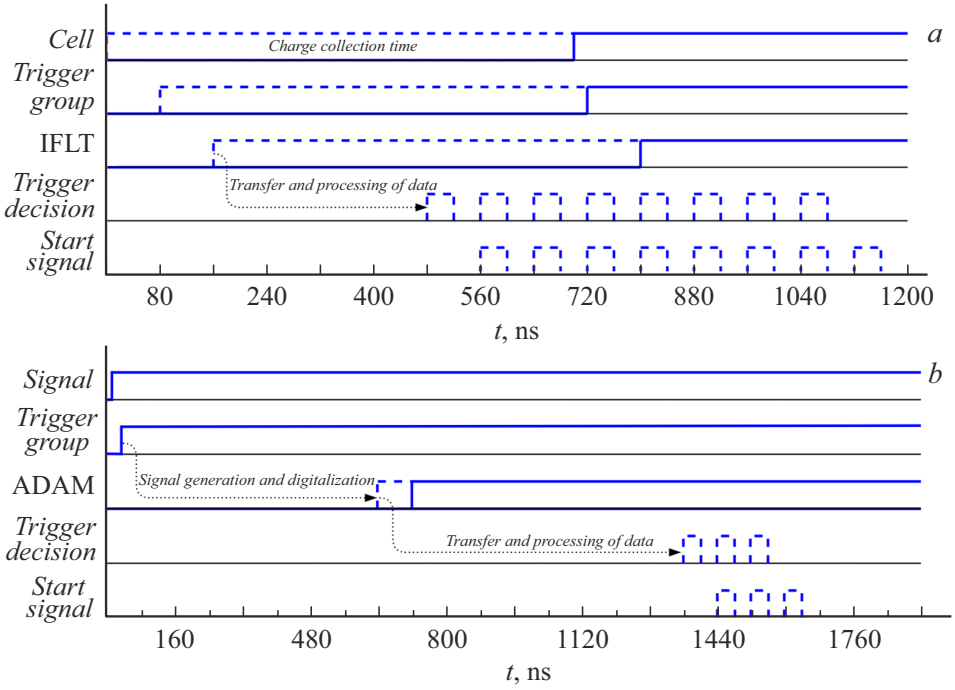


Рис. 4. Временны́е диаграммы работы заряженного (a) и нейтрального (b) триггеров.

событий. На рис. 3 приведены гистограммы эффективности заряженного и нейтрального триггеров в зависимости от полярного угла θ для событий упругого электрон-позитронного рассеяния (Bhabha-рассеяние). Из рис. 3 видно, что заряженный и нейтральный триггеры обеспечивают высокую эффективность регистрации событий во всей чувствительной области детектора, однако по мере приближения к краям эффективность плавно снижается. Разработанные критерии отбора событий позволяют с высокой эффективностью регистрировать не только события с двумя и более частицами, но и события рождения пары нуклон–антинуклон, в которых при аннигиляции античастиц сигнал возникает только в одной локальной области детектора. Первичный триггер отлично себя зарекомендовал и с его помощью набран интеграл светимости более одного обратного фемтобарна ($1\,\text{fb}^{-1}$), что знаменует поступление в элитный клуб „фабрик частиц“. Высокая эффективность триггера позволила измерить десятки физических процессов, многие с лучшей в мире точностью.

Коллайдер ВЭПП-2000 непрерывно подвергается модернизации, что приводит к увеличению светимости. Увеличение светимости позволяет изучать более редкие процессы, но и количество фоновых событий растет. Поэтому необходимо увеличивать качество отбора событий. Основной целью модернизации первичного триггера является оптимизация существующих методов отбора событий и внедрение новых, увеличение быстродействия и надежности. На первом этапе была проведена замена решающих блоков на новый триггерный модуль под названием „Блок принятия решений“. Объединение функций заряженного и нейтрального триггера в одном модуле позволяет создавать смешанные маски для отбора более сложных событий. Кроме того, использование современной элементной базы значительно расширяет возможности анализа экспериментальных событий и контроля работы первичного триггера в целом и его составных частей. Для реализации новых возможностей потребовался дополнительный быстрый канал передачи данных в ССД. Для этого в блок принятия решений был добавлен интерфейс Ethernet.

На рис. 4 приведены временны́е диаграммы работы первичного триггера с участием блока принятия решения. Временной разброс формирования решения заряженным триггером в основном определяется временем сбора заряда с проволочек дрейфовой камеры (рис. 4, a). Для нейтрального триггера временной разброс решения определяется соотношением сигнал/шум в триггерных каналах калориметров (рис. 4, b).

Функциональность блока принятия решения была протестирована в составе ССД в момент проведения экспериментов. Проводился сравнительный анализ работы прошлого варианта блоков решения и блока принятия решения. Для этого входная информация о сработавших триггерных группах подавалась одновременно на оба варианта триггерных блоков. Сравнительный анализ данных подтвердил улучшение параметров работы триггерной системы, таких как увеличение быстродействия без потери эффективности регистрации событий и уменьшение разброса триггерного решения. Время поиска треков сократилось на 50 %, а кластеров — на 30 %.

Следующим этапом развития триггера будет уменьшение в 4 раза размера триггерных ячеек калориметра и передачи энерговыделения в каждом триггерном канале в блок принятия решения, заложенное в разрабатываемой новой электронике [6], которое вместе с усложнением алгоритмов обработки данных позволит кардинально улучшить соотношение сигнал/фон [7]. В настоящее время при анализе многофотонных событий близкие частицы сливаются в один кластер. Например, при распаде эта-мезона на три нейтральных пиона возникает шесть фотонов, но в событии определяется четыре, максимум пять кластеров, поэтому порог можно поставить только на четыре кластера. Основным фоновым процессом к нему являются события квантовой электродинамики (КЭД), в которых вероятность возникновения каждой дополнительной частицы пропорциональна постоянной тонкой структуры $\alpha = 1/137$. Правильный подсчет количества кластеров позволит поднять порог до пятишести кластеров и подавить фон от событий КЭД на несколько порядков. Еще более сложными для регистрации являются события двухфотонного рождения, сейчас недоступные для исследования из-за большого уровня фона. Для их выделения недостаточно информации о кластерах, а нужно в режиме реального времени вычислять кинематические параметры, например инвариантную массу двух кластеров. Расширенный функционал блока принятия решения позволил реализовать и экспериментально проверить на реальных событиях с детектора предложенный для новой электроники алгоритм отбора событий двухфотонного рождения нейтрального пиона. Было показано значительное подавление фона даже при текущем размере триггерных ячеек. Развитие триггера в новой электронике кратно улучшит точность определения кинематических параметров и откроет дорогу к изучению нового класса событий.

Более десяти лет на детекторе КМД-3 проводятся эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. В настоящее время ведутся работы по развитию первичного триггера и разработке новой электроники для увеличения точности исследования редких многофотонных процессов и изучения недоступных в настоящее время событий двухфотонного рождения. Созданный блок принятия решений на протяжении года успешно эксплуатировался в эксперименте и позволил набрать интегральную светимость более $50\,\text{pb}^{-1}$. В процессе набора экспериментальных данных новый блок продемонстрировал исключительно высокие показатели эффективности и надежности. Возросшая гибкость системы позволила существенно упростить ее использование, конфигурацию и техническое обслуживание. Расширенная функциональность блока принятия решения позволила экспериментально проверить новый алгоритм отбора событий двухфотонного рождения нейтрального пиона, разработанный для проекта новой электроники, и показала хорошие перспективы для исследования этого сложного процесса.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-42-10025 и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф23РНФ-118 (в части разработки новой электроники) и в рамках государственного задания FWGM-2025-0057 (в части, относящейся к уже существующей электронике).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Д.Е. Беркаев, Д.Б. Шварц, П.Ю. Шатунов, Ю.А. Роговский, А.Л. Романов, И.А. Кооп, Ю.М. Шатунов, И.М. Землянский, А.П. Лысенко, Е.А. Переведенцев, А.С. Станкевич, А.И. Сенченко, Б.И. Хазин, А.В. Анисенков, С.Е. Гаязов, А.Н. Козырев, А.Е. Рыженков, Д.Н. Шемякин, Л.Б. Эпштейн, С.И. Середняков, П.М. Астигеевич, Д.П. Коврижин, К.А. Мартин, А.Е. Образовский, И.К. Сурин, Л.В. Кардапольцев, О.В. Беликов, К.М. Горчаков, А.Н. Кирпотин, А.Н. Скринский, ЖЭТФ, **140** (2), 247 (2011). [D.E. Berkaev, D.B. Shwartz, P.Yu. Shatunov, Yu.A. Rogovskii, A.L. Romanov, I.A. Koop, Yu.M. Shatunov, I.M.Zemlyanskii, A.P. Lysenko, E.A. Perevedentsev, A.S. Stankevich, A.I. Senchenko, B.I. Khazin, A.V. Anisenkov, S.E. Gayazov, A.N. Kozyrev, A.E. Ryzhenenkov, D.N. Shemyakin, L.B. Epshtein, S.I. Serednyakov, P.M. Astigeevich, D.P. Kovrizhin, K.A. Martin, A.E. Obrazovskii, I.K. Surin, L.V. Kardapoltsev, O.V. Belikov, K.M. Gorchakov, A.N. Kirpotin, A.N. Skrinskii, JETP, **113** (2), 213 (2011). DOI: 10.1134/S1063776111060136].

[2] B.I. Khazin, Nucl. Phys. B — Proc. Suppl., **181-182**, 376 (2008). DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068

[3] A.A. Ruban, V.M. Aulchenko, K.I. Kakhuta, A.N. Kozyrev, A.N. Selivanov, V.M. Titiov, Yu.V. Yudin, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **598**, 317 (2009). DOI: 10.1016/j.nima.2008.08.033

[4] F. Grancagnolo, G. Fiore, F.V. Ignatov, A.V. Karavdina, B.I. Khazin, A. Miccoli, V.S. Okhapkin, S.G. Pivovarov, A.S. Popov, A.A. Ruban, A.L. Sibidanov, I.G. Snopkov, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **623**, 114 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2010.02.166

[5] V.E. Shebalin, R.R. Akhmetshin, A.V. Anisenkov, V.M. Aulchenko, N.S. Bashtovoy, D.A. Epifanov, L.B. Epshteyn, A.L. Erofeev, A.A. Grebenuk, D.N. Grigoriev, F.V. Ignatov, V.F. Kazanin, O.A. Kovalenko, A.N. Kozyrev, A.E. Kuzmenko, A.S. Kuzmin, I.B. Logashenko, K.Yu. Mikhailov, V.S. Okhapkin, G.P. Razuvaev, A.A. Ruban, B.A. Shwartz, V.M. Titov, A.A. Talyshev, Yu.V. Yudin, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **824**, 710 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2015.11.128

[6] В.Г. Петроченко, А.О. Горковенко, Д.Н. Григорьев, А.Н. Козырев, А.А. Рубан, Д.В. Шёлковый, Л.Б. Эпштейн, Ю.В. Юдин, Физика элементарных частиц и атомного ядра, **56** (3), 1056 (2025). [V.G. Petrochenko, A.O. Gorkovenko, D.N. Grigoriev, A.N. Kozyrev, A.A. Ruban, Dz.V. Shoukovy, L.B. Epshtein, Yu.V. Yudin, Phys. Part. Nuclei, **56** (3), 639 (2025). DOI: 10.1134/S1063779624702046].
[7] Д.В. Шёлковый, С.Н. Гаркуша, А.О. Горковенко, Д.Н. Григорьев, Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук, **60** (4), 317 (2024). DOI: 10.29235/1561-2430-2024-60-4-317-326