

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.663

ЗАЩИТА СЕПТУМА В УСКОРИТЕЛЕ У-70 С ПОМОЩЬЮ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

©2026 г. С. Ф. Решетников, А. Г. Васильева, А. А. Дурум, М. Ю. Костин,
Е. В. Парменова, И. В. Полуэктов, Ю. Е. Сандомирский,
Ю. А. Чесноков*, А. А. Янович

*Института физики высоких энергий им. А.А. Логанова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”*

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

**E-mail: Chesnokov@ihep.ru*

Поступила в редакцию 05.05.2026

После доработки 11.06.2026

Принята к публикации 27.07.2026

На крупных ускорителях циркулирующий пучок частиц выводится из кольца с помощью устройств, называемых септумами. Часть циркулирующего пучка наводится на апертуру септума, отделенного металлической перегородкой, и отклоняется дальше электростатическим или магнитным полем. Частицы, попадающие в перегородку, вызывают ее радиационный разогрев и создают фон на установках. Экспериментально показано, что кристаллический отклоняющий прибор, установленный на определенном расстоянии от септума, путем отражения частиц в массиве изогнутых кристаллов может уменьшить долю частиц, взаимодействующих с перегородкой, на 65%.

Ключевые слова: ускорители, вывод пучка, септум-магниты, изогнутые кристаллы, каналирование

1. ВВЕДЕНИЕ

На крупных циклических ускорителях для подачи пучка частиц на экспериментальные установки используется медленный вывод пучка – это управляемый процесс постепенного извлечения ускоренных заряженных частиц из циклического ускорителя в экспериментальные каналы. В отличие от быстрого вывода, когда весь пучок выбрасывается за один оборот (микросекунды), медленный вывод растягивает этот процесс во времени – от сотен миллисекунд до нескольких секунд. Частицы покидают ускоритель не все сразу, а равномерным непрерывным потоком. Сначала для раскачивания амплитуд бетатронных колебаний для части частиц в ускорителе используется стохастический [1] или резонансный процесс [2], затем эти частицы направляются на специальные устройства,

называемые септумами [3]. Схема работы такого устройства показана на рис. 1 слева. Часть циркулирующего пучка наводится в апертуру септума, отделенного металлической перегородкой, и отклоняется дальше электростатическим или магнитным полем. Частицы, попадающие в перегородку, вызывают радиационный разогрев перегородки и создают фон на установках. Кристаллический отклоняющий прибор, установленный на определенном расстоянии от септума, может уменьшить долю частиц, взаимодействующих с перегородкой, путем каналирования или отражения частиц в изогнутом кристалле, как это показано на рис. 1 справа.

Рис. 1. Схема защиты септум-магнита кристаллом в ускорителе

Первые экспериментальные результаты такого применения кристалла были получены на ускорителях У-70, СПС и бустере Фермилаб [4–6].

В частности, при использовании одиночной изогнутой кристаллической полоски в режиме каналирования на ускорителе СПС в ЦЕРН затенение электростатического септума составило 40% [5]. На У-70 был проведен демонстрационный эксперимент по защите магнитного септума СМ24 с использованием пучка быстрого вывода, который наводился прямо на нож септума, причем на У-70 применялось более эффективное мульткристаллическое устройство, работающее на отражении [4]. При оптимальной ориентации кристалла потери уменьшились на 58%.

Таким образом, экспериментально была продемонстрирована возможность использования объемного отражения протонного пучка мульткристаллическим устройством для защиты септум-магнитов в ускорителях.

Следующим этапом является защита септума на реально работающем медленном выводе. Для этого создано и проверено на канале частиц 4а ускорителя У-70 новое оптимальное устройство.

2. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ

Кристаллическое устройство должно отклонять значительную долю пучка в апертуру септума с первого оборота за счет объемного отражения [7–11], увеличивая эффективность вывода. Меньшая доля пучка (порядка 10% [12]) отклоняется в сторону ускорителя и участвует в многооборотном процессе. Поэтому параметры устройства оптимизированы с учетом этого фактора, который приводит к ограничению изгиба каждой полоски до величины 0.3 мрад, чтобы отклоненный пучок не терялся на апертурах вакуумной камеры У-70.

Для радиационной защиты токовой перегородки выводного септум-магнита предлагается устройство для кратного отклонения протонного пучка несколькими изогнутыми полосками кремния в режиме объемного отражения. Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки, оно происходит на малой длине в области касательной к изогнутой атомной плоскости. Вероятность однократного отражения высока, при энергиях около 100 ГэВ она приближается к единице. Для увеличения значения угла отражения и практического применения объемного отражения необходимо увеличить значение угла отклонения заряженных частиц. Это делается с помощью взаимно ориентированных с высокой точностью кристаллов, расположенных последовательно. Для защиты септум-магнита У-70 с токовой перегородкой 2 мм мы разработали устройство “бутерброд” (рис. 2). Устройство содержит 42 изогнутых кристалла в виде изогнутых полосок. Шесть полосок по 3 мм длиной вдоль пучка усиливают эффект отражения, а семь слоев толщиной 350 мкм поперек пучка обеспечивают необходимый поперечный размер 2.4 мм. Все кремниевые полоски вырезаны из одной большой пластины завода-изготовителя с ориентацией (111) с точностью 2'. Направление резки также одинаково, чтобы не сбить взаимную ориентацию полосок. В основе метода поперечного изгиба полосок лежит принцип использования анизотропии кристаллической решетки. Процесс разворачивается следующим образом. Металлический кристаллодержатель накладывает продольный изгибающий момент вдоль оси Y (см. рис. 2б). В силу присущего кристаллической решетке свойства анизотропии (см., например, [13], с. 85) рождается поперечный изгиб кристалла с радиусом, чья кривизна несколько меньше продольной (см. рис. 2в). Так, для кристаллов кремния с ориентацией (111) этот коэффициент достигает значения примерно 4. Именно этот поперечный изгиб и служит инструментом для точнейшего отклонения пучка частиц (см. рис. 2а). Уникальные конструктивные решения, в особенности внушительная высота кристалла (рис. 2б), позволили кардинально улучшить фоновые условия. Это стало возможным благодаря тому, что материал металлического держателя, в отличие от материалов менее продуманных систем, полностью исключен из траектории прохождения пучка. Этот метод изгиба кристалла-полоски мы предложили в 1998 г. [14], и сейчас он применяется на нескольких ускорителях, включая БАК.

Рис. 2. а – Схема работы устройства на основе последовательности кристаллов...

Поскольку критический угол каналирования при энергии 50 ГэВ $\theta_c = 27$ мкрад, угол отражения на одной полоске равен 40 мкрад, а на шести полосках устройства составляет 240 мкрад.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА НА ПУЧКЕ С ЭНЕРГИЕЙ 50 ГЭВ

Работы по тестированию устройства проводились на выведенном пучке в канале частиц 4а. Вывод в канал 4а протонного пучка с энергией 50 ГэВ интенсивностью около 10^6 протон/цикл обеспечивался с помощью изогнутого кристалла, установленного в 27-м блоке У-70. На выходе канала был получен параллельный пучок с расходимостью $\sigma_x, \sigma_y \sim 0.1$ мрад, который направлен на установку “Кристалл”, схема установки приведена на рис. 3.

Рис. 3. Схема установки

Начальное выравнивание кристаллического устройства осуществлялось с помощью отражения лазерного луча от граней кристалла до меток, связанных с протонным пучком. Интенсивность прямого пучка протонов измерялась сцинтилляционными счетчиками S_1 и S_2 в режиме совпадений, а отклоненного кристаллом пучка – счетчиками S_3 и S_m . Счетчик S_3 был смонтирован около торца кристалла, он мог перемещаться вместе с ним в гониометре благодаря оптоволоконному соединению с фотоэлектронным умножителем. Ориентационный эффект действия кристалла на пучок находился с помощью двух методик: с помощью сканирующего счетчика S_m и наблюдения 2D-профиля пучка цифровой телевизионной камерой с люминофорным экраном (медицинский люминофор на основе иттриевого соединения). Режим обработки информации с камеры оптимизировался (подбирался коэффициент усиления, время экспозиции и т.д.).

Эффект отражения в последовательности кристаллов начинается, когда угол падения частиц находится в створе угла изгиба полосок, как показано на рис. 2а (это случай ориентированного относительно пучка кристалла). В случае, если угол падения частицы больше угла изгиба кристалла (разориентированный кристалл), отражения не происходит. Кристалл ведет себя как слабый аморфный рассеиватель. С помощью вращения кристалла в гониометре с мелким шагом 20 мкрад и наблюдения профилей пучка за кристаллом при каждом фиксированном угловом положении с помощью описанных методик находилась оптимальная ориентация кристалла в пучке, когда тень от кристаллического устройства на профиле пучка была максимальна.

Окончательное измерение эффекта затенения пучка кристаллическим устройством было проведено с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки GAFCHROMIC EBT3 [15], которая обеспечивала наибольшую точность измерений. Активный компонент пленки состоит из кристаллов радиационно-чувствительного мономера субмикронного размера. Когда пленка подвергается воздействию ионизирующего излучения, начинается реакция полимеризации, что приводит к изменению ее оптической плотности, а

глубина изменения пропорциональна поглощенной дозе (соответственно потоку прошедших частиц) в активном слое. Процесс полимеризации не передается от кристалла к кристаллу, и после облучения отсутствует процесс проявления, который мог бы изменить размер или форму частиц. Следовательно, эта пленка имеет пространственное разрешение в микронах, которое ограничено только оборудованием, используемым во время работы. Пленка сканировалась на планшетном сканере EPSON EXPRESSION 10000 XL в пропускающем режиме без цветокоррекции, с разрешением 2400 точек на дюйм. В результате мы получили 48-битное цветное изображение по 16 бит на канал в формате TIFF. Оцифрованное изображение обрабатывалось по красному каналу. Значение оптической плотности для одного пикселя изображения определялось из выражения

$$D(x_i, y_j) = \lg \frac{I_0(x_i, y_j)}{I(x_i, y_j)},$$

где $I_0(x_i, y_j)$, $I(x_i, y_j)$ – интенсивности цвета для пикселя с координатами до и после облучения пленки соответственно. Абсолютная калибровка пленки проводилась однократно с использованием сцинтилляционных счетчиков в режиме накопления статистики за несколько сотен циклов ускорителя.

Рисунок 4 демонстрирует возможность затенения септума кристаллическим устройством.

Рис. 4. Измеренный профиль пучка на расстоянии 7 м после кристалла:

Как видно на рис. 4, в случае ориентированного кристалла на профиле образуется большой провал, вызванный отклонением частиц за счет объемного отражения. Коэффициент затенения при тестировании на канале частиц составил 65% (это заметно лучше, чем ранние результаты ЦЕРН, составлявшие 40%).

4. ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА НА ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ ПУЧКЕ

Схема расположения кристаллического устройства и септума CM24 в кольце показана на рис. 5 (номера внизу рисунка обозначают номера магнитных блоков У-70).

Рис. 5. Расположение кристалла Si в 22 магнитном блоке У-70 для защиты септума магнита CM24.

На данный момент, кроме кристаллического устройства, подготовлены высоковакуумный гониометр для размещения кристалла и монитор для измерения потерь BLM (beam loss monitor) на септуме CM24.

Для моделирования эксперимента проведены расчеты Монте-Карло (рис. 6), использующие модель взаимодействия частиц с многополосковым кристаллом [11] и экспериментально измеренные распределения частиц по координате при медленном выводе.

При попадании частицы на кристаллическое устройство угол отклонения разыгрывался из распределения для цепочки из шести изогнутых кристаллов, согласно работе [11]. Движение частиц от кристалла до септума описывалось матрицей перехода с учетом геометрии опыта и структурных функций (α и β) ускорителя и набег фазы $\Delta\mu$ ([16], с. 18):

$$\begin{pmatrix} x'_2 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_1 \\ x_1 \end{pmatrix},$$

где x – поперечная координата, $x' = dx/ds$ – угол между направлением скорости частицы и продольной осью,

$$\begin{aligned} D_{11} &= \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} (\cos(\Delta\mu) + \alpha_1 \sin(\Delta\mu)) = a_1 = 0.6058, \\ D_{12} &= \sqrt{\beta_1 \beta_2} \sin(\Delta\mu) = a_2 = 23.1061 \text{ м}, \\ D_{21} &= -\frac{1 + \alpha_1 \alpha_2}{\sqrt{\beta_1 \beta_2}} \sin(\Delta\mu) + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\sqrt{\beta_1 \beta_2}} \cos(\Delta\mu) = b_1 = 0.0114 \frac{1}{\text{м}}, \\ D_{22} &= \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}} (\cos(\Delta\mu) - \alpha_2 \sin(\Delta\mu)) = b_2 = 2.0858, \end{aligned}$$

где $\beta_1 = 41.5110 \text{ м}$, $\beta_2 = 27.3351 \text{ м}$, $\alpha_1 = 0.0275$, $\alpha_2 = -1.4068$, $\Delta\mu = 0.7559$.

Далее осуществлялась проверка: если частица попадает в апертуру септума, то она добавляется к выведенным; если во внутреннюю сторону кольца (за счет объемного захвата), то учитывается ее движение по ускорителю соответствующими матрицами перехода. На рис. 6 показан расчетный профиль выводимого пучка перед септумом. На рис. 6 видно, что провал в правой части профиля находится на координате токовой перегородки – 78 мм, он обусловлен тенью от ориентированного кристалла.

Рис. 6. Расчетный профиль выводимого пучка перед септумом

По нашим оценкам расчетный коэффициент “затенения” септума кристаллическим устройством при медленном выводе составит 60%. Эксперимент на медленном выводе запланирован на будущие сеансы У-70, когда реализуется высокая интенсивность пучка в У-70. Ожидается, что эффективность вывода может возрасти с 90% еще на несколько процентов. Немаловажными вопросами являются радиационная и тепловая стойкость кристалла в таких условиях. Оценочные потери частиц на септуме в таких условиях составят 10^{12} протонов в цикле, или $5 \cdot 10^{11}$ прот/(см² · с) с учетом размеров перегородки септума и времени цикла У-70 – 10 с. По данным нашей длительной практики, находясь в более жестких условиях непосредственно в циркулирующем пучке ускорителя, кристаллы выдерживают потоки протонов 10^{20} прот/см², сохраняя углы изгиба и каналирующие

свойства [17]. Это значит, что при защите септума кристаллы могут работать несколько лет без замены.

Подводя итог, приведем сравнительные характеристики кристаллических систем защиты септумов, применяемых на разных ускорителях (см. табл. 1). Представляется, что наш подход использования многополосковых кристаллов, использующих для отклонения пучка отражение, а не каналирование, выглядит более предпочтительно.

Табл. 1. Сравнительные характеристики кристаллической системы

Публикация	[6]	[5]	[4]	Данная
Ускоритель	Бустер, Фермилаб, 8 ГэВ	СПС, ЦЕРН, 450 ГэВ	У-70 ИФВЭ, 50 ГэВ	У-70 ИФВЭ, 50 ГэВ
Септум	Электро- статический	Электро- статический	Магнитный	Магнитный
Кристалл L·H (длина, ширина)	Тип: полосковый 2 мм · 0.3 мм	Тип: полосковый 2 мм · 0.8 мм	Тип: многополосковый (6 · 2.5 мм) · 2 мм	Тип: многополосковый (6 · 3 мм) · 2.4 мм
Угол изгиба	0.5 мрад	0.175 мрад	1.1 мрад	0.3 мрад
Тип испытания	Не испытан	Медленный вывод	Быстрый вывод	Внешний пучок
Эффективность защиты	Ожидается примерно 50% на медленном выводе	40%	58%	65%

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на выведенном пучке протонов с энергией 50 ГэВ протестировано устройство на основе последовательности изогнутых кристаллов для защиты септум-магнита СМ24 на ускорителе У-70. Это устройство использует для отклонения частиц более эффективный механизм объемного отражения, а не каналирование в изогнутом кристалле, как это было на ускорителе СПС. Экспериментально показано, что отклоненные частицы, однократно падающие на последовательность кристаллов, образовали провал 65% на профиле пучка на расстоянии 7 м позади устройства. Оценки показывают, что при размещении устройства в 22-м блоке У-70 потери пучка на септуме при медленном выводе уменьшатся на 60%, увеличивая эффективность медленного вывода на несколько процентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов С.В., Лебедев О.П.* Стохастический медленный вывод из У-70. Новости и проблемы фундаментальной физики (ИФВЭ). 2009. №2. С. 5.
2. *Афонин А.Г., Ермолаев А.Д., Каршев Ю.Г. и др.* Атомная энергия. 2002. Т. 93. № 6. С. 425. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14962347>
3. *Fedotov Yu.S., Afonin A.G., Karshev Yu.G. et al.* Slow extraction system from ihep accelerator U-70 status and development. Proceedings of RuPAC XIX, Dubna 2004, P. 68.
4. *Афонин А.Г., Баранов В.Т., Барнов Е.В. и др.* Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. С. 223. <https://doi.org/10.31857/S1234567821040029>
[*Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., et al.* JETP Lett. 2021. V. 113. P. 226. <https://doi.org/10.1134/S002136402104007X>]
5. *Velotti F.M., Esposito L.S., Fraser M. et al.* Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. P. 093502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.093502>
6. *Nagaslaev V., Tropin I., Esposito L. et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2024. V. 1058. P. 168892. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168892>
7. *Ivanov Y.M., Petrunin A.A., Skorobogatov V.V. et al.* Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 144801. () <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.144801>
8. *Scandale W., Still D., Carnera A. et al.* Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 154801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.154801>
9. *Taratin A.M., Vorobiev S.A.* Phys. Lett. A. 1987. V. 119. P. 425. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(87\)90587-1](https://doi.org/10.1016/0375-9601(87)90587-1)
10. *Maisheev V.A.* Phys.Rev.ST Accel. Beams. 2007. V. 10. P. 084701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.084701>
11. *Маишеев В.А., Чесноков М.Ю.* ЖТФ. 2020. Т. 90. №5. С. 856. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.05.49190.265-19>
12. *Васильева А.Г., Дурум А.А., Костин М.Ю. и др.* Письма в ЖЭТФ. 2025. Т. 122. С. 10. <https://elibrary.ru/item.asp?id=82994781>
[*Vasileva, A.G. Durum A.A., Kostin M.Yu., et al.* JETP Lett. 2025. V. 122. P. 8. <https://doi.org/10.1134/S0021364025607092>]
13. *Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I.* Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin, Germany: Springer, 1997.
14. *Афонин А.Г., Бирюков В.М., Гаврилушкин В.А., Гресь В.Н. и др.* Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 68. С. 544. <https://scipeople.ru/publication/28593/>

15. *Sorriaux J., Kasperek A., Rossomme S., et al.* Eur. J. Med. Phys. 2013. V. 29. № 6. P. 599.
<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.10.001>
16. *Афонин А.Г., Баранов В.Т., Бирюков В.М., и др.* Препринт ИФВЭ 2003-33, Протвино, 2003. <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2003/ps/2003-33.pdf>
17. *Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., et al.* Int. J. Mod. Phys. A. 2018. V. 33. P. 1850138.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X18501385>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема защиты септум-магнита кристаллом в ускорителе

Рис. 2. **а** – Схема работы устройства на основе последовательности кристаллов. **б** – Внешний вид устройства. **в** – Принцип поперечного изгиба полоски за счет продольного момента сил

Рис. 3. Схема установки “Кристалл”: S_1 , S_2 , S_3 , S_m – сцинтилляционные счетчики, Si – кристалл в гониометре, TV – телевизионная камера, направленная на люминофорный экран, ЕВТЗ – дозиметрическая пленка

Рис. 4. Измеренный профиль пучка на расстоянии 7 м позади кристалла: 2D-профиль пучка за ориентированным и разориентированным относительно направления пучка кристаллами на расстоянии 7 м, **а** – ориентированный кристалл, **б** – неориентированный кристалл; **в**, **г** – соответствующие одномерные проекции профиля по горизонтальной координате

Рис. 5. Расположение кристалла Si в 22-магнитном блоке У-70 для защиты септум-магнита СМ24. Область 1 – циркулирующий пучок, 2 – выводимый пучок, СМ26 – следующий магнит по трассе вывода

Рис. 6. Расчетный профиль выводимого пучка перед септум-магнитом

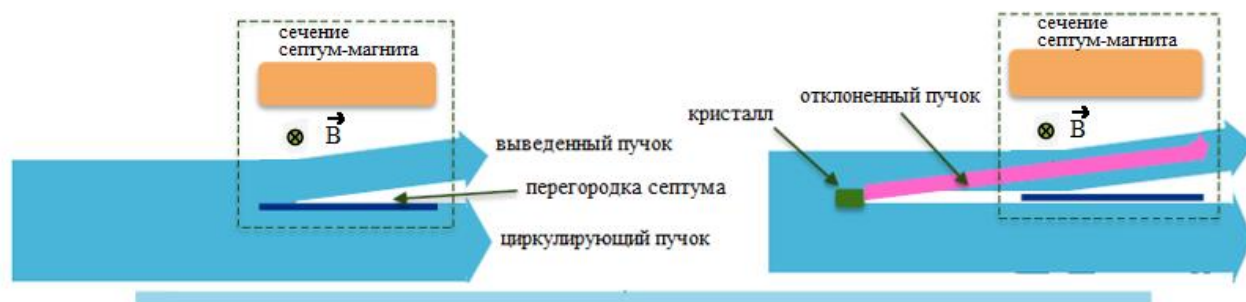


Рис. 1.

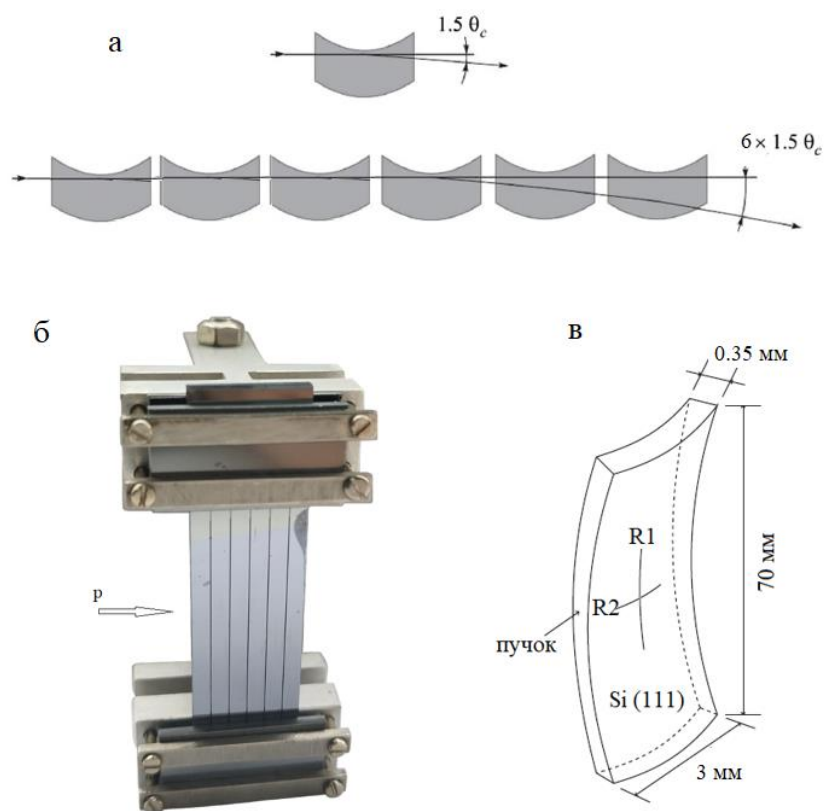


Рис. 2.

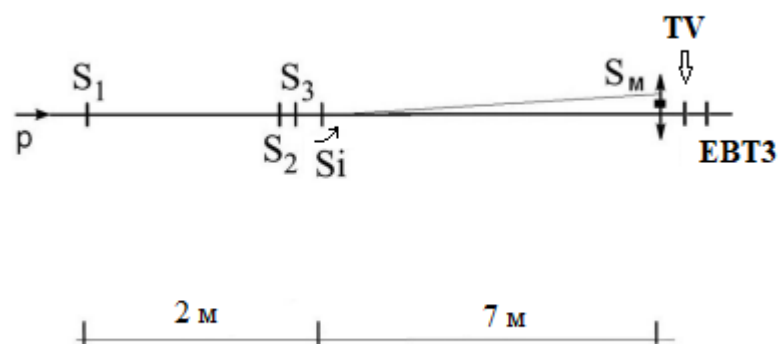
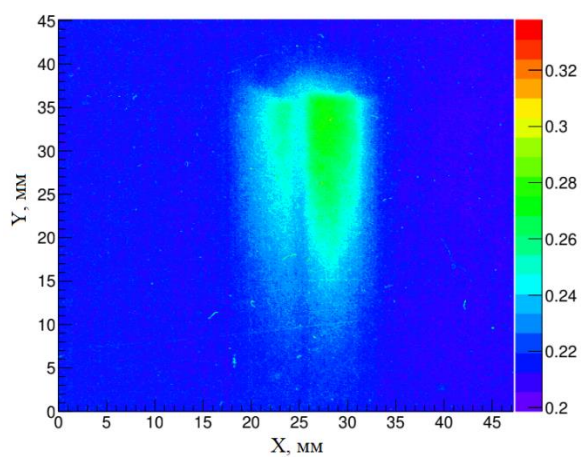
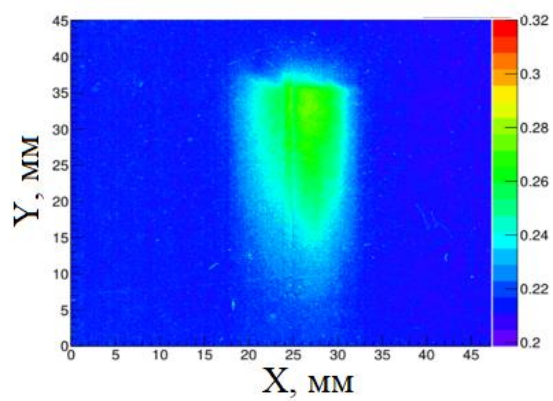


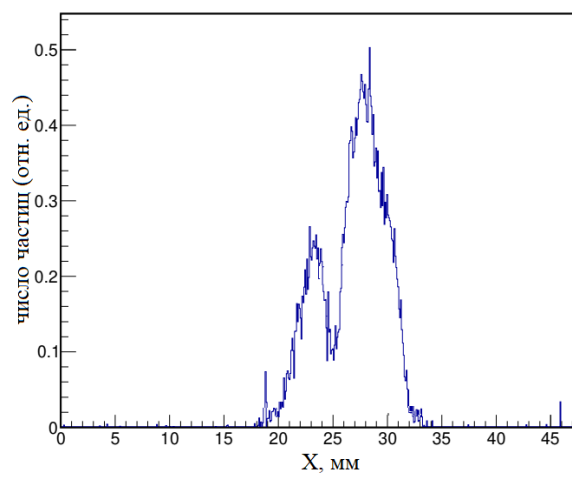
Рис. 3.



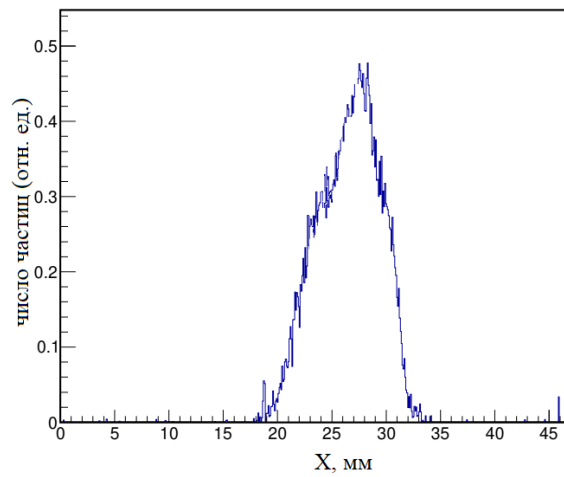
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 4.

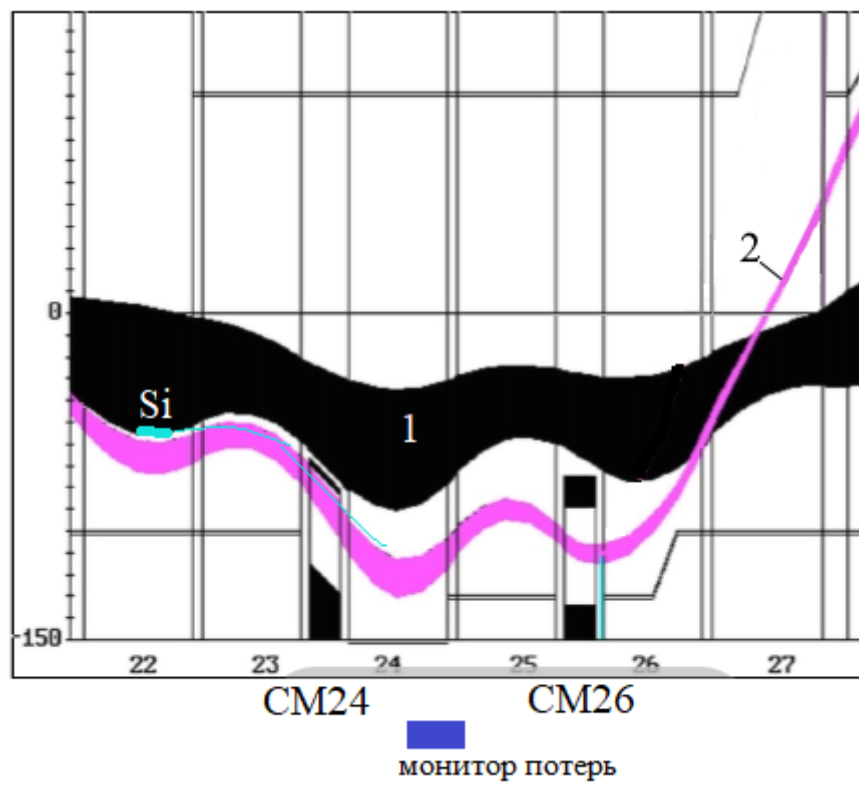


Рис. 5.

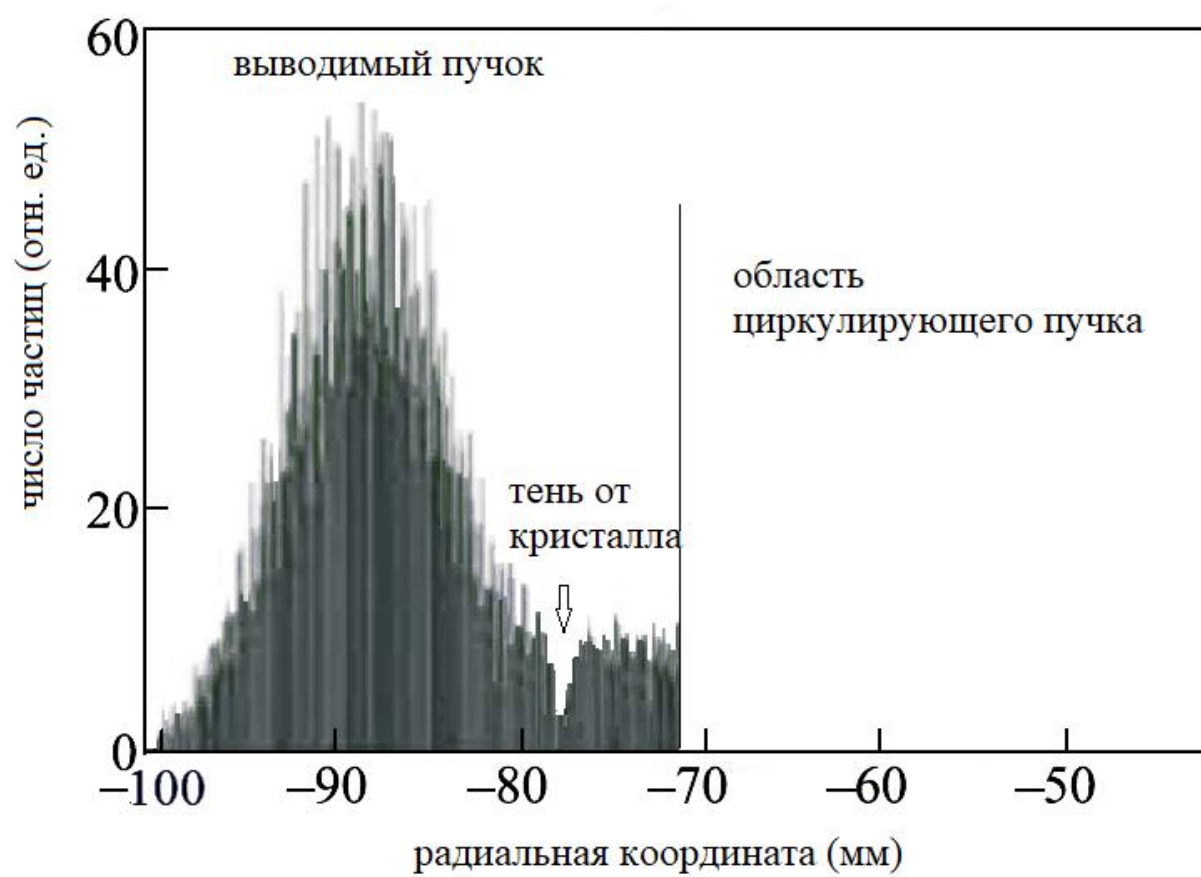


Рис. 6.