

## ВЫВОД И КОЛЛИМАЦИЯ ПУЧКА В КОЛЬЦЕВОМ УСКОРИТЕЛЕ У-70 С ПОМОЩЬЮ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

© 2011 г. А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, S. Bellucci\*, С. А. Белов, S. Vini\*, В. Н. Горлов, G. Giannini\*, А. Д. Ермолаев, И. В. Иванова, Д. М. Крылов, В. А. Майшеев, Д. А. Савин, Е. А. Сыщиков, В. И. Терехов, В. Н. Чепегин, Ю. А. Чесноков, П. Н. Чирков, И. А. Язынин

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”

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

\*LNF INFN, Frascati, Italy

Поступила в редакцию 19.07.2010 г.

Новые кристаллические устройства — массив изогнутых полосок и отражатель веерного типа на основе тонких прямых пластин — были использованы для исследования вывода и коллимации циркулирующего пучка в ускорителе при энергии 50 и 1.3 ГэВ. Показано, что с помощью этих устройств можно эффективно управлять пучком в широком интервале энергий. Для протонов с энергией 50 ГэВ была достигнута рекордная для этого метода эффективность вывода и коллимации — около 90%. Наблюдалось также уменьшение потерь частиц в 2–3 раза на ускорителе за поглотителем при применении разных кристаллов в сравнении с обычной одноступенчатой схемой коллимации пучка стальным поглотителем.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большой практический интерес к созданию на ускорителях малоэнергичных, <1 ГэВ, ультрастабильных пучков частиц малого эмиттанса, например, для медицинских и биологических целей. Поэтому задача отклонения и вывода частиц малой энергии из ускорителя представляется достаточно актуальной.

При высоких энергиях, >10 ГэВ, для этих целей успешно используется отклонение пучка заряженных частиц в изогнутом кристалле (см., например, [1–3]). Однако создание отклоняющих устройств для пучков частиц с низкой энергией сопряжено с серьезными проблемами, связанными с небольшим размером изогнутых кристаллов.

Действительно, эффективность отклонения частиц определяется отношением критического угла каналирования  $\theta_c$  к расходимости пучка  $\phi$  и убывает экспоненциально с длиной кристалла  $L$ :

$$Eff \sim (\theta_c/\phi)\exp(-L/L_d),$$

где характерный параметр  $L_d$  — длина деканалирования — относительно мал для низкой энергии. Например, для  $E = 500$  МэВ мы имеем  $\theta_c = 0.24$  мрад и  $L_d = 0.4$  мм. С обычным изогнутым кристаллом (~1 мм длиной) была достигнута только 10%-ная эффективность отклонения пучка частиц с энергией 0.5 ГэВ [4] на выведенном пучке.

Еще большие проблемы возникают при выводе циркулирующего пучка из кольцевого ускорителя, поскольку здесь требуются кристаллы со значительными поперечными размерами, превы-

шающими его длину. При этом угол изгиба кристалла должен быть >1 мрад, чтобы отклоненный пучок хорошо отделялся от циркулирующего. Потенциально для этих целей могут быть использованы изогнутые кристаллы квазимозаичного типа [5] или тонкие плоские кристаллы [6, 7], но и в том, и в другом случае необходимо увеличить угол отклонения частиц в несколько раз.

В данной работе обсуждаются возможности двух методов отклонения и вывода пучка на основе предлагаемых нами новых кристаллических устройств, которые могут эффективно работать в широком интервале энергий и особенно перспективны при энергиях ниже 1 ГэВ.

### КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Первый способ базируется на использовании массива коротких изогнутых кристаллов (рис. 1) субмиллиметровой длины (для производства таких полосок использовались специальные тонкие кремниевые пластины толщиной ~100 мкм). При этом изгиб массива происходит так же, как изгиб одиночной, хорошо изученной кремниевой полоски [8].

Второй способ основан на отражении частиц на очень тонких прямых кристаллических пластинах, толщина которых равна нечетному числу полувольт колебаний траектории частицы при каналировании:  $L = (2n + 1)/(2\lambda)$ , где  $\lambda = \pi d/\theta_c$ ,  $d = 2.3 \text{ \AA}$  — межплоскостное расстояние в кремнии. Это означает, например, что оптимальная длина кристалла должна быть 10 мкм для частиц с энер-

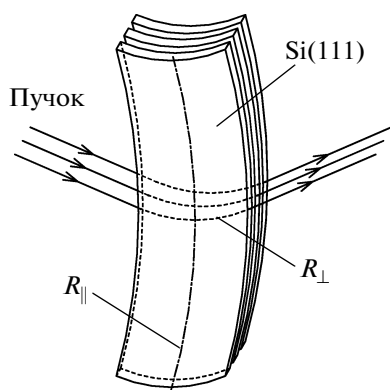


Рис. 1. Массив изогнутых кремниевых полосок для поворота пучка за счет каналирования.

гией 50 ГэВ. Угол отражения в одной оптимальной по длине кремниевой пластине приблизительно равен двойному критическому углу каналирования  $\theta_c = (2U_0/pv)^{1/2}$ , где  $U_0 \sim 20$  эВ – величина плоскостного канала в кремнии;  $p$ ,  $v$  – соответственно импульс и скорость налетающей частицы. Для увеличения угла отклонения предусмотрено несколько ориентированных кристаллических пластин, развернутых подобно вееру (рис. 2).

Для оптимального отклонения пучка в этой конструкции каждый следующий кристалл разворачивается на угол  $2\theta_c$ . Тогда суммарный угол поворота может достигать величины  $2\theta_c N$ , где  $N$  – количество кристаллических пластин. Если разворот веера и толщина пластин неоптимальны, происходит поворот пучка на меньший угол, и полученная картина более сложна для интерпретации. На рис. 3 для понимания процесса представлены расчеты для однократного прохождения пучка через веер при его разных параметрах.

К ускорительному эксперименту были подготовлены три разных устройства: обычная кристаллическая полоска (технология описана в [8]), кристаллический массив (см. рис. 1) и сборка веерного типа (см. рис. 2). Реализованные схемы устройств приведены на рис. 4. Параметры кристаллов представлены в таблице.

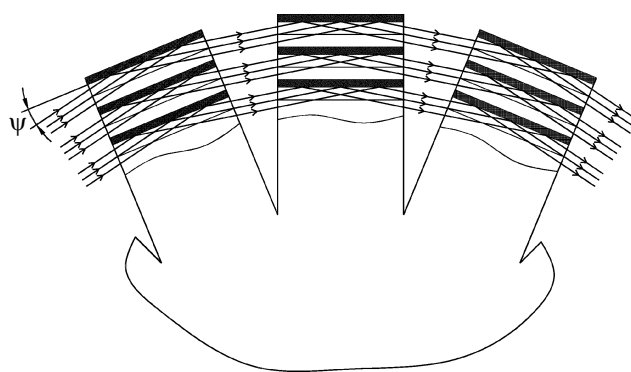


Рис. 2. Веерный отражатель для поворота пучка частиц с использованием тонких прямых кристаллов. Схематично показано отражение траекторий частиц от атомных плоскостей.  $\psi$  – угол влета частиц,  $\psi \leq \theta_c$ .

## ОПИСАНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте три кристалла в высоковакуумных гониометрах поочередно вводились в гало циркулирующего пучка ускорителя У-70, как показано на рис. 5. Угол изгиба кристаллов был достаточен, чтобы разделить в пространстве циркулирующий и отклоненный пучки. Эффект отклонения пучка за счет каналирования измерялся детектором вторичной эмиссии, расположенным на торце поглотителя в вакуумной камере ускорителя вблизи циркулирующего пучка. Параметры ускорителя описаны в [9]. Детали экспериментального оборудования показаны на рис. 6.

Для проведения опыта была создана новая автоматизированная система диагностики пучка, включающая в себя 5 мониторов потерь на основе ионизационных камер и 2-плоскостной стационарный профилометр на основе вторичной эмиссии, установленный непосредственно перед поглотителем в вакуумном объеме и регистрирующий параметры отклоненного пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Система сбора и обработки данных основана на использовании промышленного компьютера с шиной PCI. В туннеле ускорителя размещены два каркаса предварительной электроники для интегрирования сигналов с электродов профилометра. Первый каркас вмещает 24 измерительных

Тип кристалла	Длина по пучку, мм	Поперечный размер, мм	Угол отклонения пучка, мрад	Эффективность коллимации, %		Эффективность каналирования, %	
				50 ГэВ	1.3 ГэВ	50 ГэВ	1.3 ГэВ
Полоска	1	0.3	1.0	$91 \pm 2.5$	$30 \pm 2.5$	$86 \pm 2.5$	$\sim 0$
Массив	0.9	$7 \times 0.2$	1.1	$77 \pm 2.5$	$40 \pm 2.5$	$72 \pm 2.5$	$\sim 20$
Веер	$7 \times 0.25$	3	$\sim 7 \times 0.05$	$82 \pm 2.5$	$35 \pm 2.5$	$70 \pm 2.5$	$\sim 5$

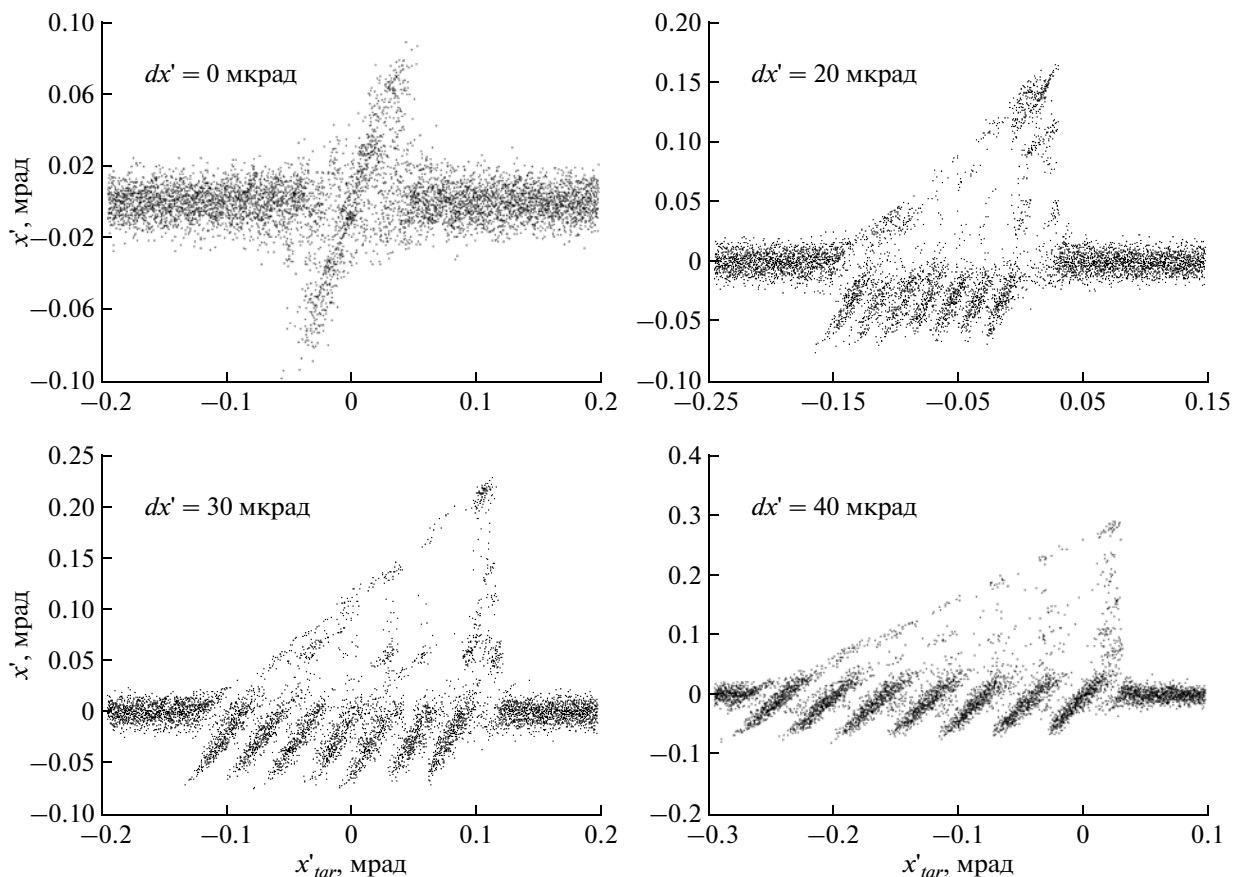


Рис. 3. Распределение протонов с энергией 50 ГэВ по углам  $x'$  после прохождения кристаллического веера из семи пластин в зависимости от его угловой ориентации  $x'_{tar}$  к пучку для различных значений разворота соседних пластин веера  $dx'$ .  $L = 10$  мкм.

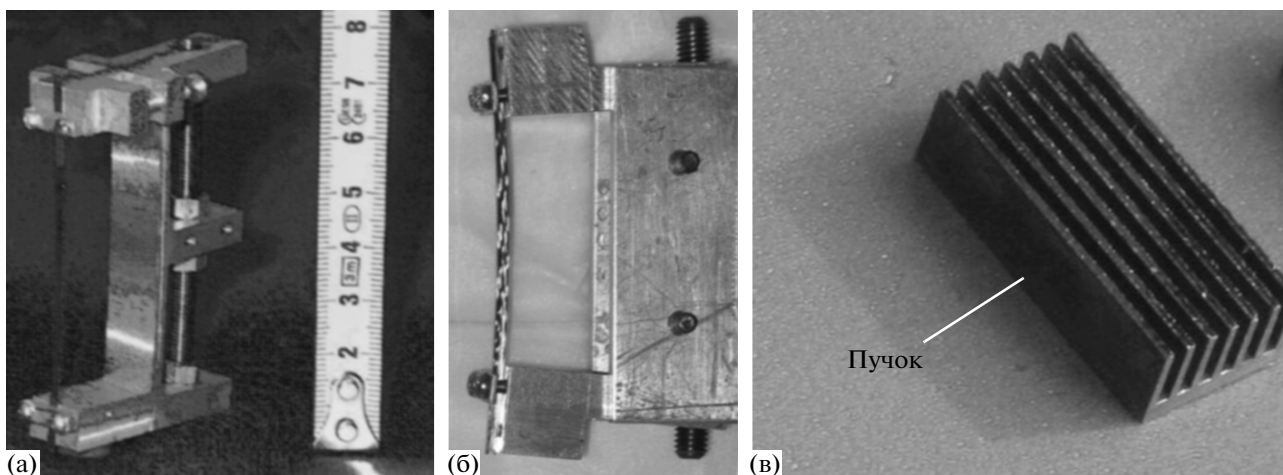


Рис. 4. Реализованные схемы устройств: изогнутая полоска (а), массив полосок (б), веер пластин (в).

канала для регистрации распределения плотности пучка по горизонтали и 8 каналов для интегрирования сигналов с мониторов потерь. Второй каркас с 32-мя измерительными каналами предна-

значен для 32-канального вертикального профиллометра. В каждом каркасе сигналы с интеграторов мультиплексируются и по общим коаксиальным кабелям поступают на 2 входа 8-канального

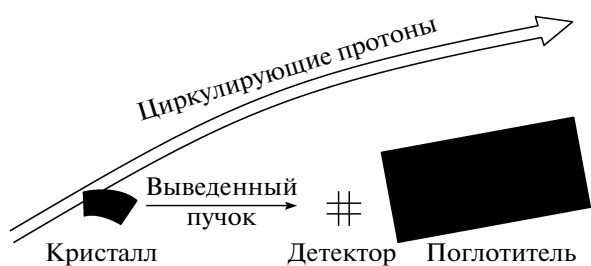


Рис. 5. Схема вывода и коллимации пучка кристаллами.

а.ц.п., интегрированного в промышленный компьютер. На другие входы этого а.ц.п. поступает другая необходимая вспомогательная информация, как то: интенсивность пучка перед его сбросом на поглотитель и напряжения, пропорциональные токам бамп-магнитов, позициям кристаллов и др. Программное обеспечение для сбора и обработки информации основано на применении платформы LabVIEW.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились при двух значениях кинетической энергии ускоренного пучка протонов: 50 и 1.3 ГэВ.

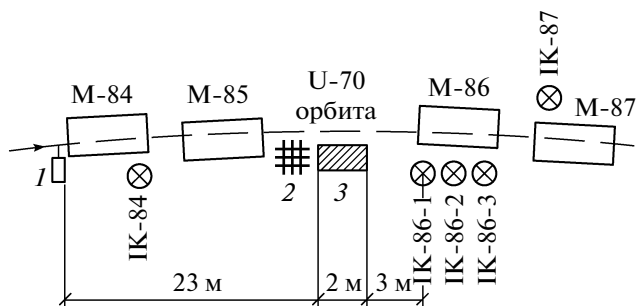


Рис. 6. Расположение оборудования в ускорителе. 1 — кристаллическая станция, 2 — профилометр, 3 — поглотитель; ИК-84, ИК-86, ИК-87 — ионизационные камеры, M-84–M-87 — магнитные блоки ускорителя.

Измерялись эффективности коллимации и каналирования, а также потери частиц на ускорителе за поглотителем и их зависимости от ориентации кристалла. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 7–12 и в таблице.

Результаты измерения при энергии протонов 50 ГэВ представлены на рис. 7–11. Рис. 7 иллюстрирует позитивный эффект от применения кристаллов, когда они используются в качестве первичного элемента системы, касающегося пучка (пучок подводился к кристаллу с помощью медленно нарастающего поля бамп-магнита).

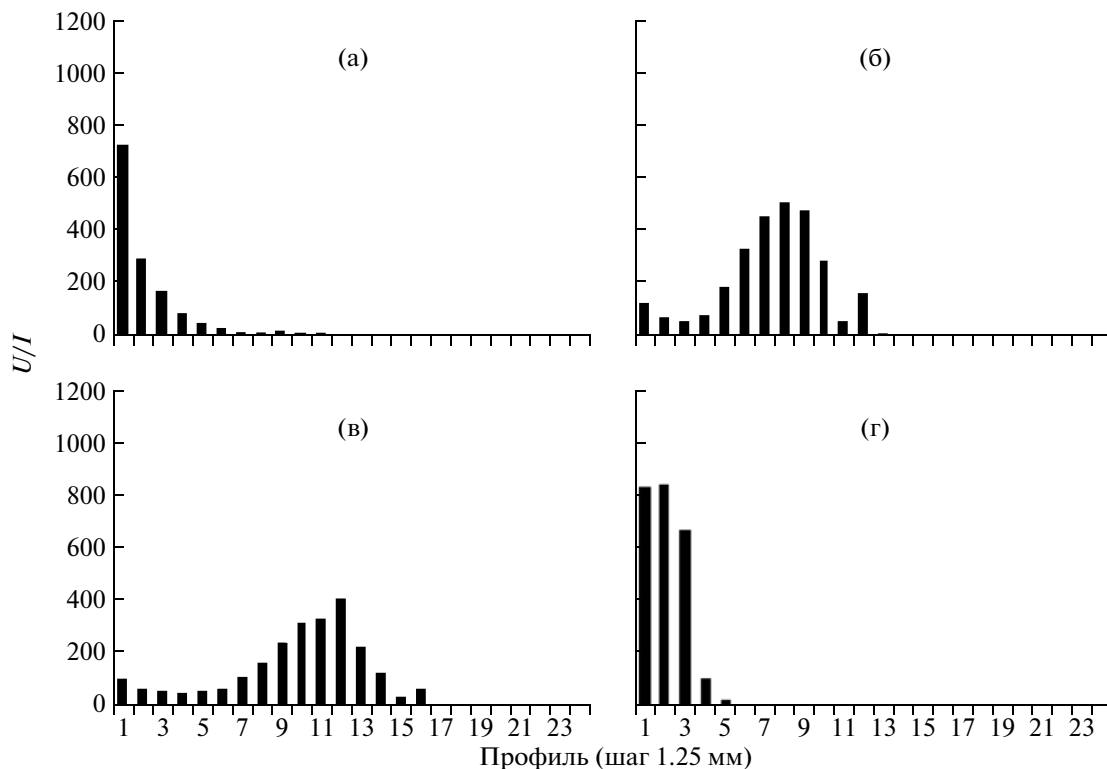
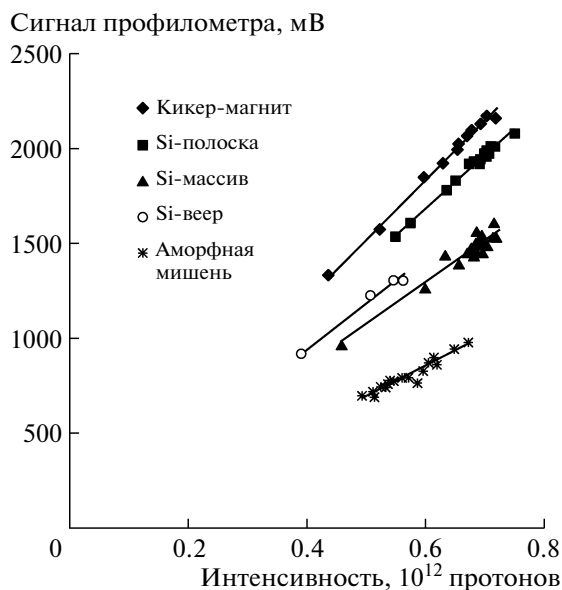


Рис. 7. Профили пучка на входе в поглотитель при энергии 50 ГэВ: а — наведение без кристалла; б — одиночная кристаллическая полоска; в — кремниевый массив; г — сборка пластин верного типа.



**Рис. 8.** Сравнение суммарного сигнала профилметра при работе разных кристаллов с эффектом заброса пучка кикер-магнитом при энергии пучка 50 ГэВ.

Профили пучка на расстоянии 23 м за кристаллом на входе в поглотитель показаны для четырех случаев. В первом случае (рис. 7а) кристалл выведен из пучка, пучок касается стенки поглотителя и рассеивается на ней, как на аморфной мишени. Как и ожидалось, пик пучка находится на краю детектора, на расстоянии ~1 мм от стенки поглотителя (циркулирующий пучок проходит с левой стороны детектора на рисунке).

Второй, третий и четвертый случаи (рис. 7б–7г) соответствуют ориентированным кристаллам: одиночной полоске (рис. 7б), кремниевому массиву (рис. 7в), сборке пластин веерного типа (рис. 7г). Во всех этих случаях кристаллы каналируют большую часть частиц в глубь поглотителя. Глубокий заброс частиц улучшает коллимацию пучка или

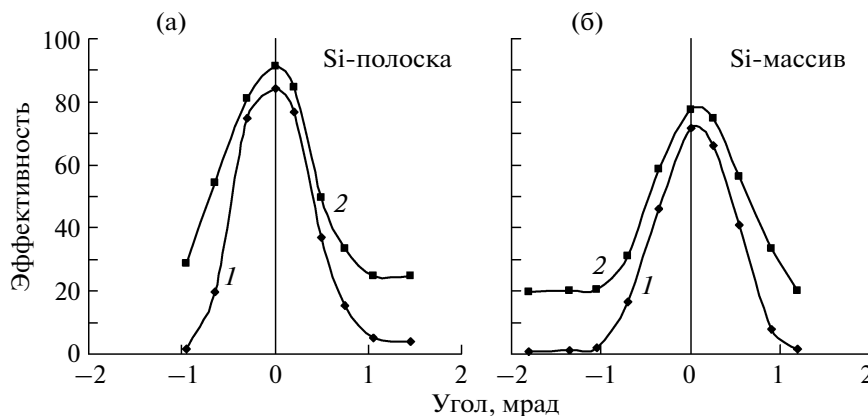
может быть использован для вывода циркулирующих частиц из ускорителя.

Для определения эффективности коллимации была проведена калибровка детектора с помощью кикер-магнита. На рис. 8 приведен суммарный сигнал детектора при отклонении пучка разными кристаллами в сравнении с эффектом однооборотного заброса пучка на детектор быстрым кикер-магнитом (при этом весь пучок размером 6 мм попадает в апертуру детектора). Измеренные эффективности коллимации для трех рассматриваемых кристаллов равны соответственно 91, 77 и 82%. Количество частиц в каналированном пике соответственно равно 86, 72 и 70%. Таким образом, все кристаллы хорошо отклоняют пучок с энергией 50 ГэВ. Полученные данные хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования с использованием программы SCRAP-ER [10], учитывающей многооборотный характер движения частиц в реальной структуре ускорителя и многократное взаимодействие их с кристаллом.

На рис. 9 приведены зависимости эффективности коллимации и каналирования разными кристаллами от угла ориентации кристалла.

Рис. 10 иллюстрирует потери частиц, измеренные по сигналам пяти ионизационных камер, расположенных в окрестности поглотителя, в зависимости от ориентации кристалла.

Потери при оптимальной юстировке кристаллов уменьшаются в 2–3 раза по сравнению с разориентированным случаем, что соответствует расчету. Примерно во столько же раз должна снизиться интенсивность мюонного факела за поглотителем вдали от ускорителя, что является немаловажным фактором при достижении в ускорителе высокой интенсивности пучка циркулирующих протонов. Рис. 11 демонстрирует эффект уменьшения потерь частиц на ускорителе за поглотителем при применении разных кристаллов по сравнению с обычной одноступенчатой схемой коллимации пучка стальным поглотителем.



**Рис. 9.** Эффективности коллимации (1) и каналирования (2) в зависимости от угла ориентации кристалла для полоски (а) и для массива полосок (б).

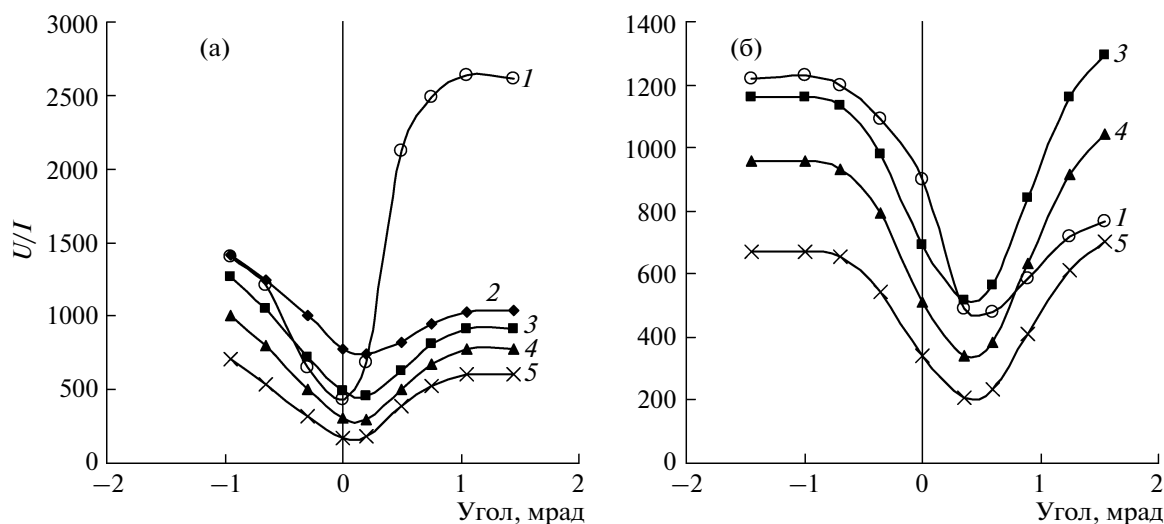


Рис. 10. Ориентационные зависимости мониторов потерь для полоски (а) и массива полосок (б) при энергии пучка протонов 50 ГэВ. Цифры у кривых – номера ионизационных камер.

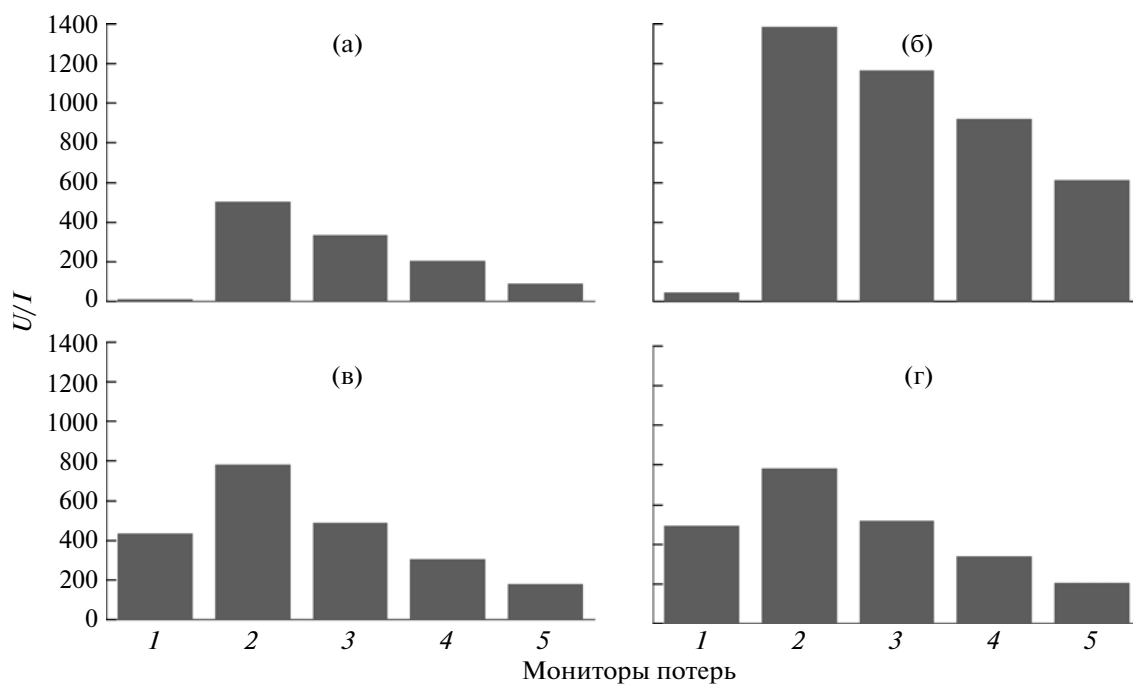
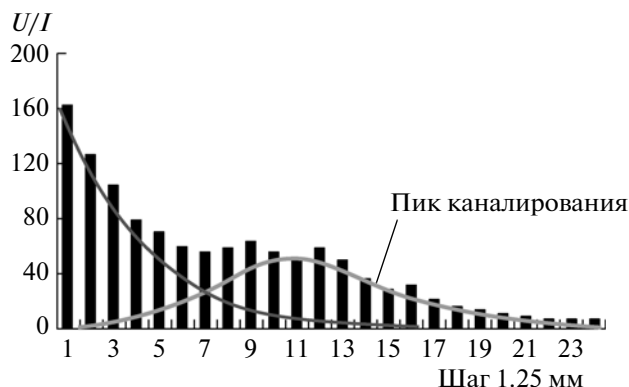


Рис. 11. Потери частиц на ускорителе за поглотителем при энергии пучка протонов 50 ГэВ для разных случаев коллимации: а – кикер-магнит (100%-ная эффективность коллимации), б – обычная коллимация стенкой поглотителя, в – кристаллическая полоска, г – массив полосок.

При энергии пучка 1.3 ГэВ эффективность применения кристаллических устройств значительно ниже (см. таблицу). Наилучший результат, каналированный пик 20%, продемонстрировал массив из семи тонких кристаллов. Большая потеря эффективности объясняется неоптимальностью наведения пучка бампом. При низкой энергии

из-за большого размера пучка, ~50 мм, происходит дрейф угла наведения, что должно устраниться при наведении пучка высокочастотным шумом (эта работа запланирована). На рис. 12 показан профиль пучка 1.3 ГэВ, отклоненный кристаллическим массивом. Фракция каналированного пика выделена жирной линией (каналированный пик



**Рис. 12.** Профиль пучка на поглотителе для протонов с энергией 1.3 ГэВ, отклоненных кристаллическим массивом.

хорошо отделен от циркулирующего пучка и примерно соответствует эффективности возможного вывода частиц за пределы ускорителя).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что созданные кристаллические устройства могут работать в широком диапазоне энергии и быть использованы для организации низкоэнергетичных пучков на У-70 для медицинских целей. Оптимизацию кристаллических устройств для низких энергий планируется провести позднее в тестовой зоне лаборатории ЛНФ, где имеется доступный пучок частиц с энергиями 50–700 МэВ [4].

Потери частиц на ускорителе за поглотителем при применении описанных кристаллов уменьшились в 2-3 раза по сравнению с обычной одно-

ступенчатой схемой коллимации пучка стальным поглотителем. Примерно во столько же раз должна снизиться интенсивность мюонного факела за поглотителем вдали от ускорителя, что является немаловажным фактором для достижения более высокой интенсивности циркулирующего пучка в У-70.

Работа поддержана Дирекцией ГНЦ ИФВЭ, Госкорпорацией Росатом (контракт № Н.4е.45.03.09, 1047), грантом РФФИ № 08-02-01453-а, а также грантом № 09-02-92431-КЭ а совместного проекта РФФИ–Консорциум EINSTein (Италия).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I.* Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators. Berlin: Springer, 1997.
2. *Scandale W., Still D., Carnera A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 154801.
3. *Mokhov N.V., Annala G., Apyan A. et al.* // FERMI-LAB-CONF-09-173-APC. Fermilab, Batavia., 2009.
4. *Bellucci S., Balasubramanian S., Grilli A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. B252. P. 3.
5. *Ivanov Yu.M., Petrunin A.A., Skorobogatov V.V.* // JETP Letters. 2005. V. 81. P. 99.
6. *Taratin A., Tsyganov E., Bavizhev M. et al.* Preprint SSCL-545. Texas, 1991.
7. *Strokov S., Takahashi T., Endo I. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. B252. P. 16.
8. *Afonin A.G., Baranov V.T., Biryukov V.M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 094802.
9. *Afonin A.G., Baranov V.T., Biryukov V.M. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2005. V. 36. P. 21.
10. *Degtyarev I.I., Liashenko O.A., Yazynin I.A.* // Proc. of EPAC 2000. Vienna, Austria. P. 2506.