



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2023–16

А.В. Максимов, Ю.А. Бабенко, Л.И. Копылов, М.П. Овсиенко

**Разработка протонного микроскопа на  
базе радиографического комплекса ПРГК-100**

Протвино 2023

**Аннотация**

Бабенко Ю.А. и др. Разработка протонного микроскопа на базе радиографического комплекса ПРГК-100: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2023–16. – Протвино, 2023. – 8 с., 5 рис., 2 табл., библиогр.: 5.

Приведены результаты по разработке магнитооптической схемы «Протонный микроскоп» на базе радиографического комплекса ПРГК-100 ускорительного комплекса У-70. Опция «Протонный микроскоп» реализуется в магнитной структуре радиографического комплекса изменением параметров квадрупольных линз без изменения их положения. Получено значение коэффициента увеличения изображения исследуемого объекта  $M > 3$  при энергии пучка протонов 50 ГэВ. Пространственное разрешение при протонном радиографировании объекта из стали толщиной 10 мм составляет менее 30 мкм.

**Abstract**

Babenko Y.A. et al. The development of the proton microscope on base proton radiographic facility PRGC-100: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2023–16. – Protvino, 2023. – p. 8, fig. 5, tables 2, refs.: 5.

The results of development of the proton microscope based on the operational proton radiographic facility PRGC-100 are presented. Magnification is achievable by repowering the existing imaging-lens quadrupoles. Achievable magnification is about 3.1 with spatial resolution less than 30 micron on static object with 50 GeV proton beam.

## **Введение**

При исследованиях в области высокой плотности вещества важной задачей является определение плотности в каждой точке объекта с хорошим пространственным и временным разрешением. Лучшее разрешение позволяют получить установки с увеличением изображения, построенные по схеме протонного микроскопа [1-3].

В период 2018-2023гг. выполнены исследования по реализации режима протонного микроскопа на ПРГК-100 – протонном радиографическом комплексе, созданном на базе ускорительного комплекса У-70. Работы проводились с целью повышения функциональных возможностей ПРГК-100. В данной статье представлены результаты.

## **Описание радиографической установки ПРГК-100**

В 2014 г. в НИЦ «КИ» - ИФВЭ введена в эксплуатацию протонографическая установка ПРГК-100 [4]. Магнитооптическая структура ПРГК-100 включает канал транспортировки пучка от протонного синхротрона У-70 и собственно ПРГК-100, состоящий из трех четвертов квадрупольных линз. Каждый четверт обеспечивает минус единичное преобразование координат частиц пучка в радиальной и вертикальной плоскостях движения. Объект располагается после первого четверта линз. В серединах второго и третьего четвертов (в точках фокуса) расположены устройства коллимации пучка. Длина каждого четверта составляет 65.2 м [5]. Структура четвертов представлена на рисунке 1.

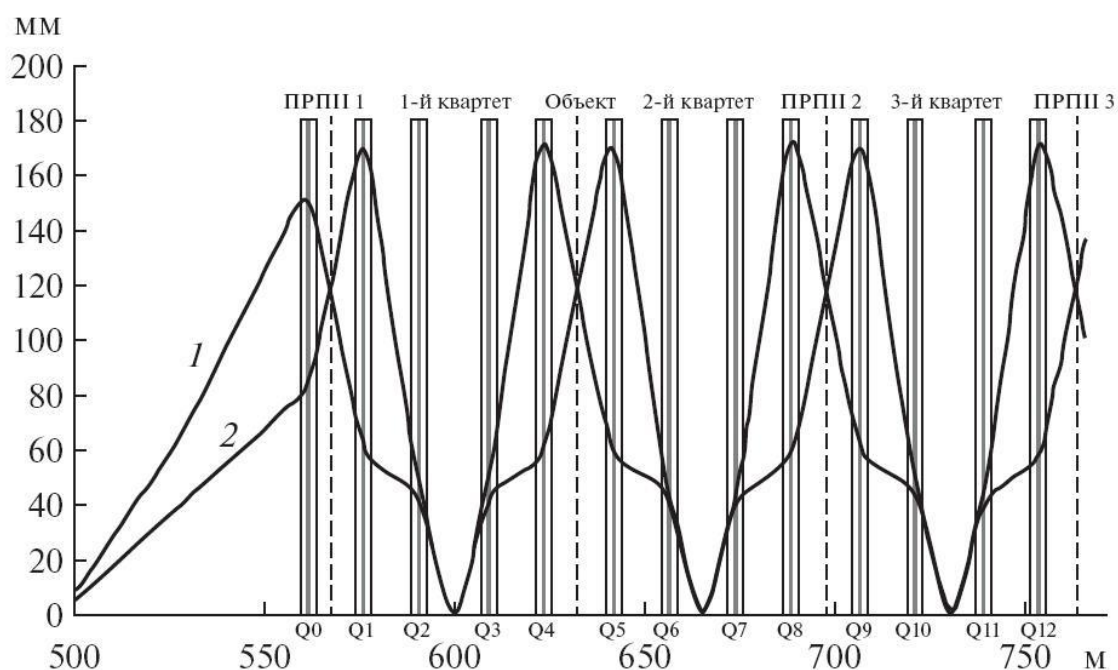


Рис. 1. Магнитооптическая структура ПРГК-100. 1, 2 – огибающие пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно; Q1–Q4 – линзы первого квартета; Q5–Q8 – линзы второго квартета; Q9–Q12 – линзы третьего квартета; ПРПИ 1 и 3 – подсистемы регистрации протонных изображений. Отмечено место расположения объекта.

Магнитооптическая система канала транспортировки позволяет управлять диаметром просвечивающего протонного пучка от  $\sim 30$  мм до  $\sim 240$  мм в зависимости от размеров исследуемого объекта и требуемой плотности потока протонов. Комплекс позволяет обеспечить протоннографирование объектов с массовой толщиной от  $\sim 10^{-1}$  г/см<sup>2</sup> до 350 г/см<sup>2</sup> с полем обзора до 240 мм при энергии протонов 50-60 ГэВ.

### Расчет микроскопа

В режиме микроскопа, первый квартал квадрупольных линз используется для регистрации параметров облучающего пучка (матрица преобразования данного квартета минус один). Следующие два квартета используются для организации собственно режима микроскопа. При расчете микроскопа должны быть удовлетворены как условие оптимальности

магнитооптической структуры для формирования изображения, так и условие согласования структуры с облучающим пучком [1].

Во-первых, для пучка содержащего частицы с разными импульсами, должно быть выполнено условие ахроматичности, т.е. независимости положения частиц в точке фокуса от импульса. Магнитооптическая система трансформирует исходный пучок с фазовыми параметрами  $(x_0, x'_0)$  на объекте в итоговое положение  $x_f = R_{11}x_0 + R_{12}x'_0$  в плоскости регистрации изображения. Условие фокуса означает независимость положения от угла  $x'_0$  и выполняется для импульса, где  $R_{12}=0$ . Протоны с другим импульсом находятся вне фокуса. В первом приближении положение таких частиц определяется выражением:

$$x_f = Mx_0 + (R'_{11}x_0 + R'_{12}x'_0)\delta \quad \text{или:}$$

$$x_f = Mx_0 + (R'_{11} + WR'_{12})x_0\delta + R'_{12}\varphi\delta$$

где  $M = R_{11}$  – коэффициент увеличения изображения,  $\delta = \frac{\Delta p}{p}$  – относительное отклонение импульса частицы,  $R'_{11}, R'_{12}$  – производные элементов матрицы по  $\delta$ ,  $\varphi$  – угол рассеяния частицы на объекте. Для частиц, находящихся на линии фазового наклона облучающего пучка,

$$x'_0 = Wx_0, \quad \text{где } W = -R'_{11}/R'_{12},$$

выполняется условие ахроматическими и их положение не зависит от импульса.

Во-вторых, в середине 2-го квартета (в конце первого дублета) располагается коллиматор барабанного типа, позволяющий дистанционно выбрать и выставить коллиматор нужного диаметра для данного объекта. Облучающий пучок на объекте должен быть согласован таким образом, чтобы в середине 2-го квартета обеспечивалась плоскость Фурье:  $D_{11} + W \cdot D_{12} = 0$ , где  $D_{11}, D_{12}$  – элементы матрицы преобразования дублета. Оба указанных условия должны выполняться для двух плоскостей X и Y.

Теоретический поиск режима затруднен в силу того, что компоновка магнитооптических элементов комплекса не может быть изменена, а также, ввиду относительной слабости градиентов линз для задачи реализации режима микроскопа. В процессе исследований было найдено несколько вариантов режима «микроскоп», но по тем или иным причинам практическая реализация их была технически затруднена. Для практического исследования был выбран режим с коэффициентами увеличения изображения  $M_x \approx M_y \approx 3.1$ . В этом режиме, из

16-ти линз 2-го и 3-го квартетов последние 4 линзы были выключены. На рисунке 2 показан ход лучей в режиме микроскоп в горизонтальной плоскости.

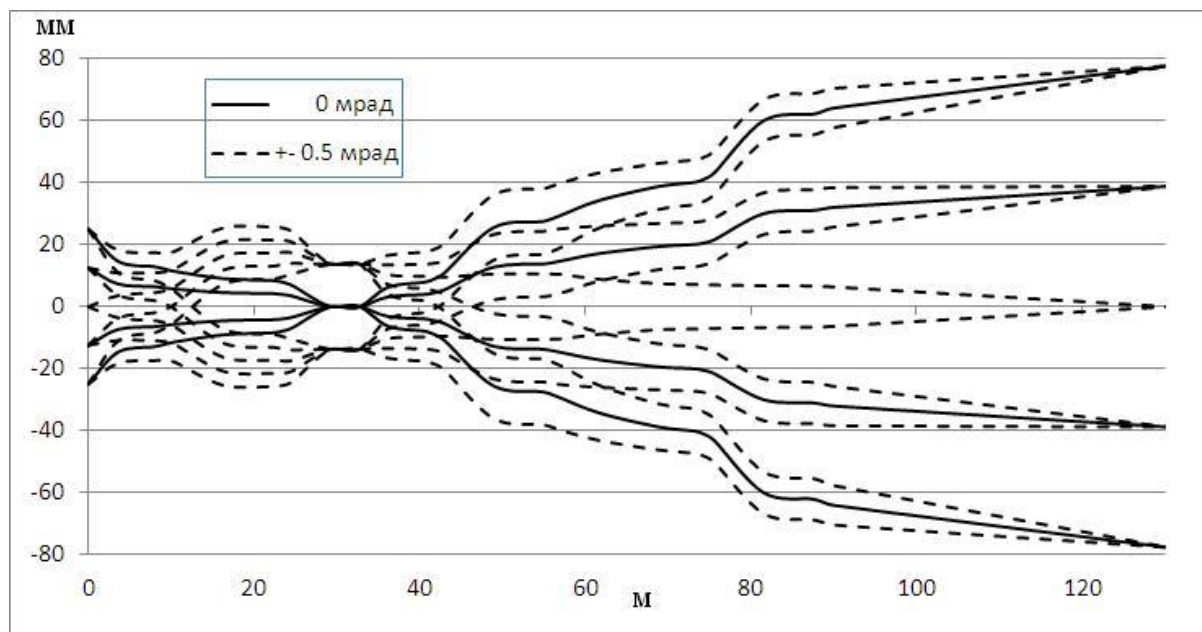


Рис. 2. Ход лучей в режиме микроскоп.

### Оценка пространственного разрешения

Пространственное разрешение определяется как минимальное расстояние между двумя точками объекта, на котором эти точки надежно идентифицируются. Граница объекта регистрируется как зона, имеющая ненулевую ширину, т.е. граница объекта размыта. Величина размытия (пространственное разрешение) определяется рядом факторов: оптическая система регистрации, размытие на разделительных диафрагмах вакуумной камеры, хроматическая aberrация, разброс токов в линзах квартетов и др. В таблице 1 приведены некоторые параметры для стандартного режима минус единичной оптики и для режима «Микроскоп».

Таблица 1.

Параметр	Минус единичная оптика	Микроскоп
Коэффициенты хроматической aberrации $\Delta R'_{12}/M$ (м) (X/Y)	96 / 96	82 / 49
Фазовые наклоны облучающего пучка (мрад/мм) (X/Y)	-0.057 / 0.057	-0.0587 / 0.0553
Зона регистрации (мм × мм)	250×250	90×90

В таблице 2 приведены расчеты величин размытия в мкм (стандартное отклонение) от каждого из факторов для указанных режимов. Расчеты выполнены для объекта «мира».

Таблица 2.

Фактор размытия	Минус единичная оптика	Микроскоп
Разделительные диафрагмы	23	8.3
Хроматическая aberrация	8.7	7.1
Воздушные промежутки	8.4	2.7
Разброс токов линз	17.0	13.7
Оптическая система	71	9.1
Итоговое размытие	78	20.3

### Практические результаты

В качестве объекта для исследования режима микроскоп использовался объект «мира» из стали толщиной 10 мм и диаметром 50 мм (рисунок 3). Объект устанавливался на воздухе в начале 2-го квартета.

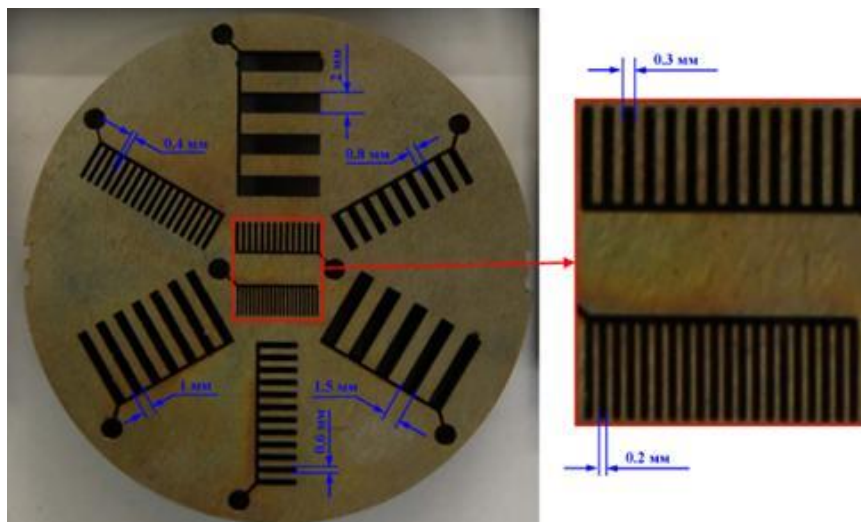


Рис. 3. Объект «мира».

Облучающий пучок диаметром  $\sim 60$  мм согласовывался по фазовым наклонам на входе в 1-й квартет. Настройка магнитооптического режима микроскопа предусматривает обеспечение условий фокуса, т.е. достижение нулевых значений элементов матрицы преобразования  $R_{x_{1,2}} = R_{y_{1,2}} = 0$ . Это достигалось специальной расчетной методикой с заданием доба-

вок к токам некоторых линз 2-го и 3-го квартетов с целью независимой корректировки элементов  $R_{x1,2}$  и  $R_{y1,2}$  и достижения минимального пространственного размытия. На рисунке 4 приведено изображение объекта в режиме микроскоп.

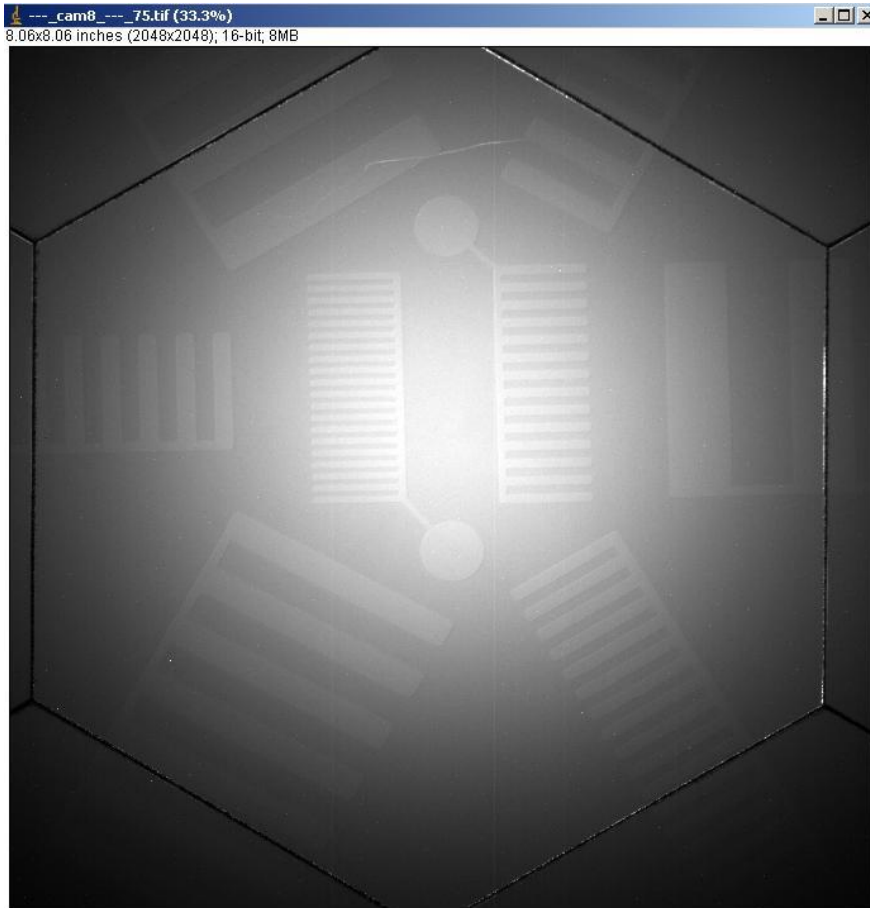


Рис. 4. Изображение объекта «мира» (зона регистрации 90×90 мм).

Пространственное разрешение определяется как стандартное отклонение фитирующей функции  $\text{erf}(x) \sim \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt$  для профиля изображения границы объекта (рисунок 5).



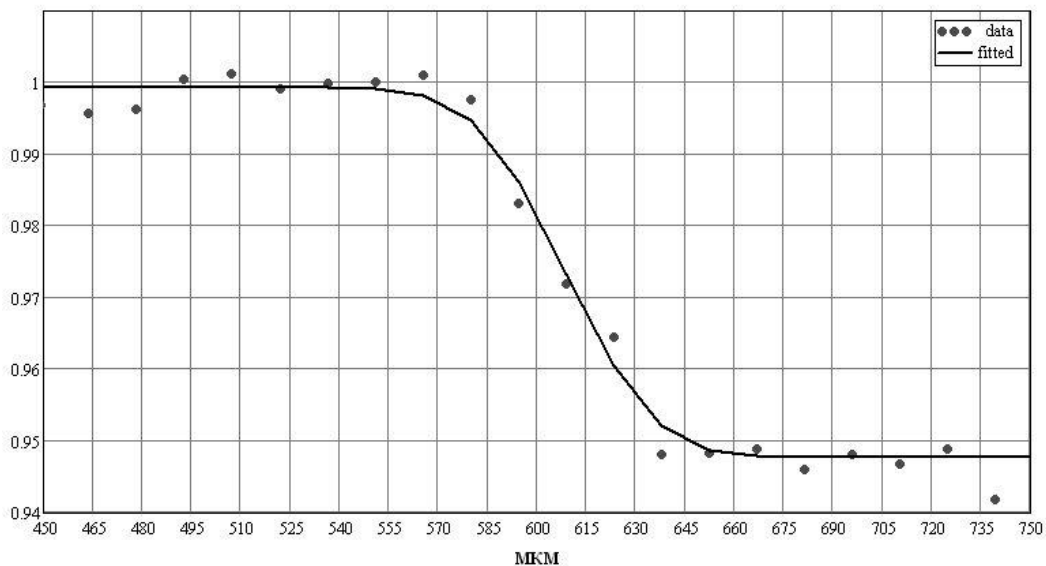


Рис. 5.   ••• профиль изображения границы объекта  
 ——— фитирующая функция.

По совокупности измерений, полученное пространственное разрешение составляет  $23 \pm 3$  мкм.

### Заключение

Представлены результаты работ по разработке магнитооптической схемы «Протонный микроскоп», реализуемой на комплексе ПРГК-100, созданном на базе Ускорительного комплекса У-70 для задач импульсной протонной радиографии. В 2018-2023гг. были проведены исследования и выполнен комплекс расчетов. Режим микроскопа реализуется в магнитной структуре радиографического комплекса изменением сил квадрупольных линз без изменения их положения. Получен коэффициент увеличения изображения объекта не менее 3 при энергии пучка 50 ГэВ. При этом пространственное разрешение при протонном радиографировании объекта из стали толщиной 10 мм составляет  $23 \pm 3$  мкм.

Авторы выражают благодарность Н.Е. Тюрину за поддержку данной работы.

## Список литературы

- [1] Mottershead T., Barlow D. et. al., «Design and operation of proton microscope for radiography at 800 MeV», 0-7803-7739-9, 2003 IEEE
- [2] Merrill F.E. et. al., AIP Conf. Proc. 1195, 2009, p.667
- [3] A.V. Kantsyrev, A.A. Colubev, A.V. Bakhmutova, et. al. «PRIOR proton microscope», Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia.
- [4] А.И. Андриянов, А.Г. Афонин и др. «Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ», Препринт ИФВЭ 2015-3, Протвино, 2015 г.;
- [5] А.В. Максимов, Н.Е. Тюрин, Ю.С. Федотов «Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ», ЖТФ, 2014, том 84, выпуск 9, стр. 132 – 138.

*Рукопись поступила 3 ноября 2023 г.*

А.В. Максимов и др.

Разработка протонного микроскопа на базе радиографического комплекса ПРГК-100.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 08.11.2023      Формат 60 × 84/16.      Цифровая печать.  
Печ.л. 0,75.    Уч.–изд.л. 1.    Тираж 60.    Заказ 18.    Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

П Р Е П Р И Н Т 2023-16,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2023

---