

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 539.1.075

**ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ДВУХКООРДИНАТНАЯ
ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА ДЛЯ УГЛЕРОДНОЙ РАДИОТЕРАПИИ**

**© 2026 г. С. А. Горохов, В. Ф. Головкин, В. И. Иньшаков,
М. К. Полковников*, В. В. Скворцов, Г. В. Фонин**

Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова

Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

Россия 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

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

Поступила в редакцию 26.03.2026

После доработки 11.08.2026

Принята к публикации 24.08.2026

Для любой установки радиолучевой терапии с использованием пучков адронов трасса оси пучка имеет принципиальное значение, так как точность позиционирования пациента на пучке и корректность последующего облучения напрямую зависят от направления оси пучка в лабораторной системе координат и в теле пациента. В работе описаны конструкция и характеристики двухкоординатной полосковой ионизационной камеры с пространственным шагом 1 мм, разработанной для экспериментального клинического комплекса ионной лучевой терапии ускорителя У-70 НИЦ "Курчатовский институт"–ИФВЭ. Описаны процедуры калибровки чувствительных элементов (стрипов) для измерения профилей пучков ионов углерода. Приведены результаты испытания камеры на пучке ионов углерода.

Ключевые слова: ионизационная камера, пучок ионов, двухкоординатная камера, радиотерапия, ионы углерода.

1. ВВЕДЕНИЕ

Двухкоординатная полосковая газовая камера используется в установках лучевой терапии для измерения пространственного положения первичного пучка, а также размера и степени однородности плоского поля при формировании дозовых объемов пучком адронов с использованием вобблер-магнитов [1]. Из-за меньшего рассеяния пучка ионов углерода в ионизационной камере (по сравнению с пучками протонов или электронов) измерение пространственных профилей интенсивности пучка с использованием плоских многоканальных ионизационных камер с пространственным шагом чувствительного

элемента 1 мм позволяет определить пространственное положение центра пучка с точностью около 0.3 мм.

Система сбора данных с полосковых газовых детекторов создана на базе ПЛИС Altera MAXII с контроллером ATMega128, вычитывающим данные с полосковых детекторов в последовательном режиме чтения информации и буферизующим данные во время вывода пучка из ускорителя. После окончания вывода данные, накопленные в буфере памяти контроллера, передаются по каналу USB в персональный компьютер и обрабатываются. Площадь активной зоны камеры по пучку составляет $19.2 \times 19.2 \text{ см}^2$. Топология электродов сформирована с использованием стандартной технологии печатных плат.

2. КОНСТРУКЦИЯ КАМЕРЫ

Конструктивная схема двухкоординатной полосковой камеры приведена на рис. 1. Медные полоски (стрипы) сигнальных электродов толщиной 18 мкм нанесены на тонкую полиимидную основу толщиной 50 мкм (2, 6 на рис. 1) и плакированы золотом для защиты от окисления. Топология каждой плоскости электродов выполнена таким образом, чтобы на каждую плоскость приходилось 192 стрипа шириной 300 мкм каждый, разделенных зазором шириной 700 мкм, четные номера стрипов выводятся на одну сторону (влево или вниз в зависимости от ориентации плоскости электрода), а нечетные номера стрипов – в противоположную сторону (вправо или вверх). Каждый стрип представляет собой анод ионизационной камеры. Катод 4 (рис. 1) изготовлен из полиимидной пленки толщиной 50 мкм, покрытой медью толщиной 18 мкм с обеих сторон. Величина воздушного зазора между плоскостью катода и плоскостью анодов определяется стеклотекстолитовыми рамками 3, 5 и составляет 2 мм. Рабочий объем заполнен воздухом. Электроды плакированы золотом для исключения их окисления. Напряжение питания камеры +24 В подключается к электроду 4.

Приведенные выше значения толщины материалов были выбраны с целью минимизации потерь энергии ионами углерода. Так, например, их общая толщина эквивалентна толщине воды 480 мкм для кинетической энергии ионов углерода 200 МэВ/нуклон и 600 мкм — для энергии ионов 410 МэВ/нуклон.

Рис. 1.

3. СЧИТЫВАНИЕ И СБОР ДАННЫХ

Структурная схема электроники считывания, разработанная для полосковой камеры, приведена на рис. 2. В структурную схему входят

- две сигнальные плоскости камеры X и Y;
- интегрирующие усилители со встроенными АЦП DDC232 (12 штук);
- промежуточная память RAM;
- программируемая логическая интегральная схема EPM570 (на схеме Altera) для выработки рабочего протокола микросхем DDC232 и обслуживания RAM;
- контроллер ATmega128 (на схеме AT128) с интерфейсными модулями связи FT-2232H;
- оптрон для связи с У70 (на схеме OPTO).

Персональный компьютер подключается по шине USB.

Электроника системы сбора данных содержит 12 плат интегрирующих усилителей DDC232. К каждой плате подключено по 32 стрипа сигнальных электродов. Микросхемы интегрируют ионизационные токи камеры и преобразуют их в цифровые коды с использованием встроенных АЦП.

Рис. 2.

Для работы с камерой используется усилитель DDC232, который представляет собой 16- или 20-разрядный 32-канальный АЦП с токовым входом. Каждый канал усилителя содержит в себе два интегратора: А и В. Такая конструкция позволяет осуществлять непрерывную интеграцию тока: пока один интегратор оцифровывается встроенным аналого-цифровым преобразователем, другой интегрирует входной ток. Для каждого канала имеется восемь различных комбинаций емкостей для обоих интеграторов. Выбор режима работы микросхемы DDC232 осуществляется путем записи управляющих кодов в регистр конфигурации. Схема подключения камеры к усилителю (на примере одного канала) показана на рис. 3.

Рис. 3.

Для работы микросхемы необходимо, чтобы ток из нее вытекал, т.е. чтобы на стрипах камеры собирались ионы. Это определяет рабочую полярность напряжения питания камеры. Время интегрирования заряда стрипа для восстановления профиля пучка определяется скоростью дрейфа заряда, временем жизни носителей заряда и средней интенсивностью пучка, приходящейся на один стрип. Максимальный заряд на один стрип можно оценить, исходя из времени вывода пучка, профиля пучка и кинетической энергии выводимого пучка.

Для напряженности электрического поля, равному 100 В/см, результат моделирования в программе Garfield++ [2] для воздушной среды при нормальных условиях

дает скорость дрейфа электронов $v_e \approx 0.45 \cdot 10^{-3}$ см/нс ≈ 4500 м/с, данные скорости дрейфа ионов не приводятся, но обычно скорость дрейфа ионов на два-три порядка ниже скорости дрейфа электронов: $v_{ion} \approx 0.001$, $v_e \approx 4.5$ м/с. Для ширины воздушного зазора камеры, равной 2 мм, это дает среднее время дрейфа $t_{ion} = 2 \text{ мм} / v_{ion} \approx 0.44$ мс, тем самым задается минимальное время интегрирования одного измерения.

С использованием программы FLUKA4-5.0 [3, 4] для рабочего воздушного газового промежутка $d=2$ мм при нормальных условиях были рассчитаны средние потери энергии ионами углерода. Для энергии ионов 450 МэВ/нуклон они составили $\Delta E = 17.88$ кэВ, а для 200 МэВ/нуклон – $\Delta E = 28.66$ кэВ.

В табл. 1 представлены результаты расчета среднего заряда на стрип шириной 1 мм от пучка ионов углерода интенсивностью $I=10^9$ частиц за вывод :

$$Q_e = \frac{I \Delta E e}{w}, \quad (1)$$

и максимального времени интегрирования этого заряда

$$t_{sample} = \frac{Q_e}{Q_{max}} t_{output}, \quad (2)$$

Величина t_{sample} определяется исходя из емкости и динамического диапазона микросхемы интегрирования. Длительность медленного вывода для У-70 равна $t_{output}=900$ мс. В формулах (1), (2) Q_e [Кл] – средний заряд в газовом промежутке на профиль за вывод, w [эВ]— энергия образования электрон-ионной пары в воздухе, Q_{max} [Кл] – средний заряд на стрип в максимуме гауссовского распределения пучка ионов, со средне-квадратичным отклонением, сигма, равным 3 мм за вывод.

Таблица 1. Средний заряд в центральном стрипе и время интегрирования одного измерения в зависимости от энергии пучка для интенсивности 10^9 частиц за вывод

Параметр	Значение	
Кинетическая энергия пучка, МэВ/ ат. ед. м.	200	450
Среднее энерговыделение на первичную частицу ΔE , кэВ	17.88	28.66
Средний заряд на профиль Q_e , нКл	132.9	82.9
Средний заряд на центральный стрип Q_{max} , нКл	15.77	9.84
Максимальное время интегрирования одного измерения t_{sample} , мс	20.0	32.0

Перед началом каждого измерения заряд на интегрирующей емкости C_f (рис. 3) сбрасывается с помощью S_{REF1} и S_{RESET} (S_{RESET} , S_{REF1} замкнуты, переключатели $S_{A/D}$, S_{INTA} , S_{REF2} разомкнуты). Таким образом, конденсатор C_f заряжается до опорного напряжения V_{REF} .

Как только интегрирующий конденсатор заряжен, переключатели S_{REF1} и S_{RESET} отключают опорное напряжение V_{REF} от усилителя, схема переходит в режим ожидания начала интегрирования (ключи $S_{A/D}$, S_{RESET} , S_{REF1} , S_{INTA} разомкнуты, ключи S_{REF2} замкнуты). Передний фронт сигнала CONV отпирает ключ S_{INTA} и начинает интегрирование входного сигнала интегратора А. Заряд от входного сигнала разряжает конденсатор C_f , в результате чего выходное напряжение усилителя снижается (Интегратор: ключи S_{RESET} , S_{REF1} , $S_{A/D}$ разомкнуты, ключи S_{INTA} , S_{REF2} замкнуты). Спад сигнала CONV останавливает интегрирование путем переключения входного сигнала с интегратора А на интегратор В (ключи S_{RESET} , S_{REF1} , S_{INTA} разомкнуты, ключи $S_{A/D}$, S_{REF2} замкнуты).

Микросхема DDC232 включена в режиме непрерывного интегрирования (Continuous Mode). Подробно с режимами работы микросхемы можно ознакомиться в работе [5] (стр. 16–19). Для работы в этом режиме микросхеме требуются три управляющих сигнала:

- 1) Главный строб-сигнал, он появляется сразу после включения питания и равен 16.384 МГц;
- 2) сигнал CONV – он служит для переключения между каналами интеграторов микросхемы DDC232, время интегрирования равно длительности сигнала CONV, в нашем случае длительность сигнала CONV можно менять в диапазоне 2–32 мс в зависимости от кода, записанного в регистр конфигурации;
- 3) Строб-сигнал чтения данных DDC232, это может быть 512 или 640 импульсов для чтения данных микросхемы в зависимости от формата данных.

После записи регистров конфигурации Altera выдает управляющие сигналы для микросхемы DDC232. Чтение данных из микросхемы начинается через 500 мкс после любого фронта сигнала CONV. Данные всех 12 микросхем считываются в Altera в свой индивидуальный 16-разрядный сдвиговый регистр. При этом записи данных во внешнюю память не происходит. После получения следующего сигнала CONV данные сдвиговых регистров перезаписываются. Строб-импульс (конец цикла ускорения и начало вывода) от У-70 разрешает запись данных микросхемы DDC232 во внешнюю память RAM. 16-разрядное слово сдвигового регистра пишется во внешнюю память в два приема: младший байт, старший байт. Еще два байта занимает информация о номере микросхемы и номере канала внутри микросхемы. Запись во внешнюю память продолжается либо до полного заполнения памяти, либо до получения команды от контроллера AT128. При полном заполнении памяти запись в память блокируется, вырабатывается сигнал запроса на чтение данных, ПЛИС Altera переходит в режим ожидания чтения данных. В работе [5] (стр. 10) указано значение емкости C_f конденсатора для каждого диапазона.

При получении команды чтения Altera отключается от шины данных, переключает память RAM в режим чтения, далее строб-импульсами перебирает нужное количество ячеек памяти. Данные памяти считываются в персональный компьютер при помощи микросхемы FT-2232H по каналу “А”. Микросхема FT-2232H производства компании FTDI представляет собой преобразователь USB-интерфейса в параллельный FIFO-интерфейс с возможностью конфигурирования в различные стандартные последовательные или параллельные интерфейсы. Микросхема сконфигурирована в режиме 245 FIFO. Параметры конфигурации сохраняются во внешней микросхеме EEPROM 93C46.

4. КАЛИБРОВКА КАМЕРЫ

Для каждого стрипа проводится двухэтапная калибровка: выравнивание электронного тракта (счетной характеристики) по опорному току (на вход каждого интегрирующего АЦП подается ток разной величины, при этом оцифровывается сигнал во всем диапазоне рабочих амплитуд АЦП) и выравнивание чувствительности к ионизирующему излучению (на камеру подается равномерный по интенсивности поток квантов от источника рентгеновского излучения, амплитуды всех стрипов нормируются на амплитуду опорного стрипа).

Калибровка выявляет неработающие или нелинейно работающие каналы микросхем DDC232 во всем диапазоне АЦП :

$$ADCv = ADC \frac{tg_{опор}}{tg_{кан}}, \quad (3)$$

выравнивание чувствительности каналов устраняет геометрические неравномерности плоскостей и газового зазора камеры:

$$S'_{кан} = \frac{S_{кан} Su_{опор}}{Su_{кан}}, \quad (4)$$

В формулах(3), (4) ADC — исходный счет АЦП-канала, ADCv — калиброванный счет АЦП-канала, $tg_{кан}$ — угол наклона калибровочной прямой для канала, $tg_{опор}$ — угол наклона калибровочной прямой для опорного канала, $S_{кан}$ — калиброванный счет АЦП-сигнала канала после вычета пьедестала, $Su_{кан}$ — счет АЦП-сигнала канала при равномерном облучении камеры, $Su_{опор}$ — счет АЦП-сигнала опорного канала при равномерном облучении камеры, $S'_{кан}$ — калиброванный счет АЦП-сигнала канала после выравнивания амплитуд.

Все поправочные коэффициенты для каждой микросхемы сохраняются в файле в формате JSON и загружаются при старте программы управлением камерой.

Амплитуда сигнала после вычитания пьедестала для каждого стрипа может быть представлена в следующем виде:

- калиброванный средний счет АЦП за время вывода пучка;
- калиброванный суммарный счет АЦП за время вывода пучка;
- суммарный заряд за время вывода пучка,

$$Q_{\text{кан}} = \frac{S'_{\text{кан}} Q(C_f)}{2^N - 1}, \quad (5)$$

где $Q(C_f)$ — значение заряда в зависимости от значения емкости C_f , N — разрядность АЦП.

5. ИСПЫТАНИЯ КАМЕРЫ НА ПУЧКЕ ИОНОВ УГЛЕРОДА

Испытания камеры на пучке ионов углерода с энергией 450 МэВ/нуклон были выполнены во время тестового сеанса в октябре 2025 года; выводился пучок в диапазоне интенсивностей от $4 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^8$ частиц за вывод, длительность вывода составляла 900 мс. Проверялась работоспособность камеры на интегрирующей емкости нескольких значений и при разных значениях интенсивности пучка.

На рис. 4 представлена зависимость тока в камере от времени вывода пучка. Система сбора данных запускается за 200 мс до начала вывода пучка. Интенсивность вывода при этом составляла $2.08 \cdot 10^8$ частиц.

Рис. 4.

Вертикальный и горизонтальный профили пучка показаны на рис. 5 для интенсивности вывода $1.6 \cdot 10^8$ частиц. Для профиля показана аппроксимация распределением Гаусса, выполненная в программе ROOT-6.16.

Рис. 5.

Для оценки линейности камеры исследована зависимость интегрального заряда пучка в профиле от интенсивности, зарегистрированной монитором; она представлена на рис. 6. Пучковый монитор был установлен в голове канала вывода.

Рис. 6.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана технология и изготовлены образцы двухкоординатной полосковой ионизационной камеры, предназначенной для контроля пространственного положения пучка ионов углерода при формировании заданного дозового объема

Блок управления камеры позволяет проводить измерения с временным интервалом 2–32 мс, что дает возможность регистрировать временную структуру сброса пучка. Две камеры были протестированы на пучке углерода, они показали свою работоспособность. Камеры показали линейную зависимость суммарного заряда в профиле от интенсивности в диапазоне от $3 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^8$ частиц за вывод.

В случае необходимости измерения профиля пучка с другими значениями интенсивности или для других типов частиц потребуется изменение газового промежутка и (или) напряжения на камере.

К особенностям эксплуатации камер нужно отнести необходимость предварительной калибровки интегрирующей емкости для каждого значения и выравнивания амплитудной чувствительности каналов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках распоряжения Правительства №263-р от 06.02.2023 г. (об утверждении Программы деятельности федерального государственного бюджетного учреждения "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" на 2023-2027 г.г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов Ю.М., Солдатов А.П. Медицинская физика. 2016. № 2 (70). С. 5.
2. CERN. A toolkit for the detailed simulation of particle detectors based on ionisation measurement in gases and semiconductors. 2025. <https://garfieldpp.web.cern.ch/>
3. Ahdida C., Bozzato D., Calzolari D. et al. Front. Phys. 2022. V. 9. P. 788253.
4. Battistoni G, Boehlen T., Cerutti F. et al. Ann. Nuclear Energy. 2015. V. 82. P. 10.
5. Texas Instruments. 32-Channel, Current-Input Analog-to-Digital Converter Datasheet. 2019. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/835490/TI1/DDC232.html>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Геометрия плоскостей анодов и катода: 1, 7 – стеклотекстолитовая охранная рамка толщиной 1.2 мм; 2, 6 – сигнальные электроды; 3, 5 – стеклотекстолитовые рамки толщиной 2 мм для объема газа; 4 – высоковольтные электроды

Рис. 2. Структурная схема камеры и электроники считывания

Рис. 3. Схема подключения камеры к усилителю

Рис. 4. Зависимость тока в камере от времени вывода пучка в вертикальном профиле при интенсивности $I = 1.6 \cdot 10^8$. Значение интегрирующей емкости составляет 37.5 пФ, время интегрирования одного измерения равно 4 мс. Пунктирной линией обозначены временные границы вывода (900 мс)

Рис. 5. Вертикальный (слева) и горизонтальный (справа) профили (распределение заряда) пучка ионов углерода при интенсивности $I = 1.6 \cdot 10^8$. Красным цветом обозначены исходные данные профиля интенсивности пучка, синим – аппроксимация гауссовым распределением.

Рис. 6. Зависимость заряда Q в вертикальном (синий цвет) и горизонтальном (красный цвет) профилях от интенсивности I вывода пучка ионов углерода

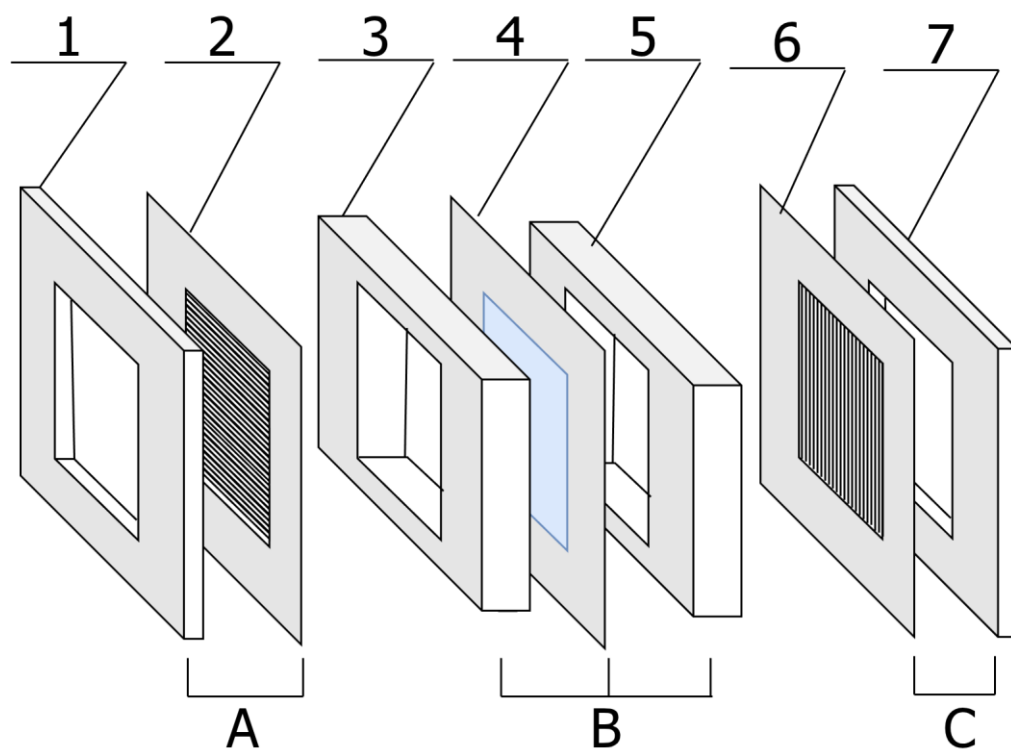


Рис. 1.

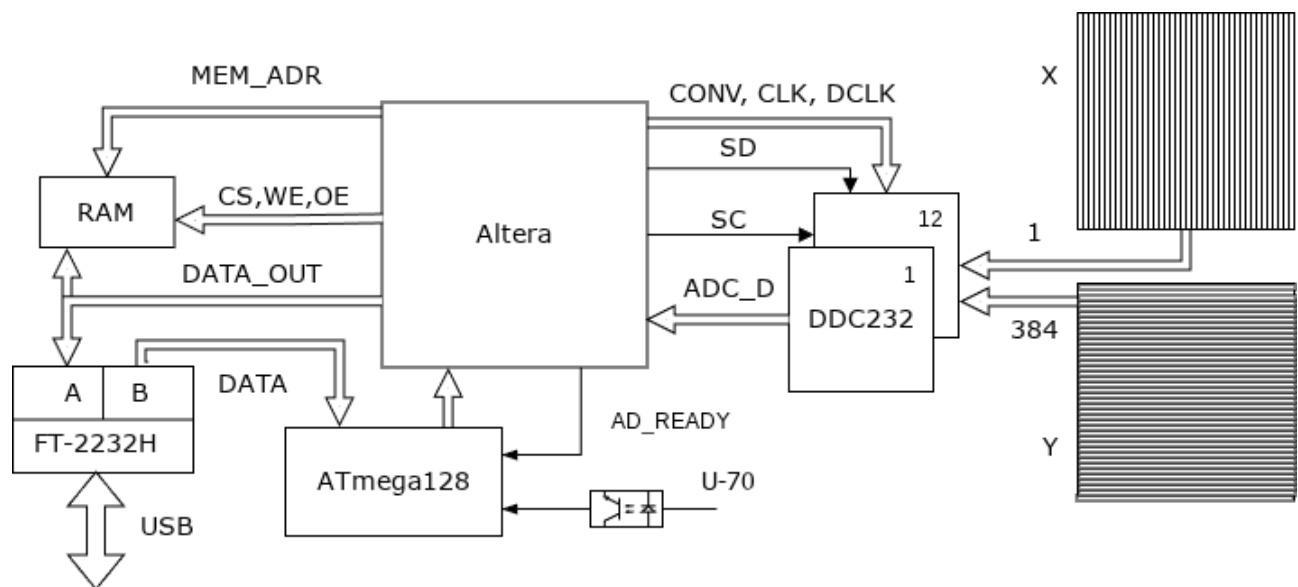


Рис. 2.

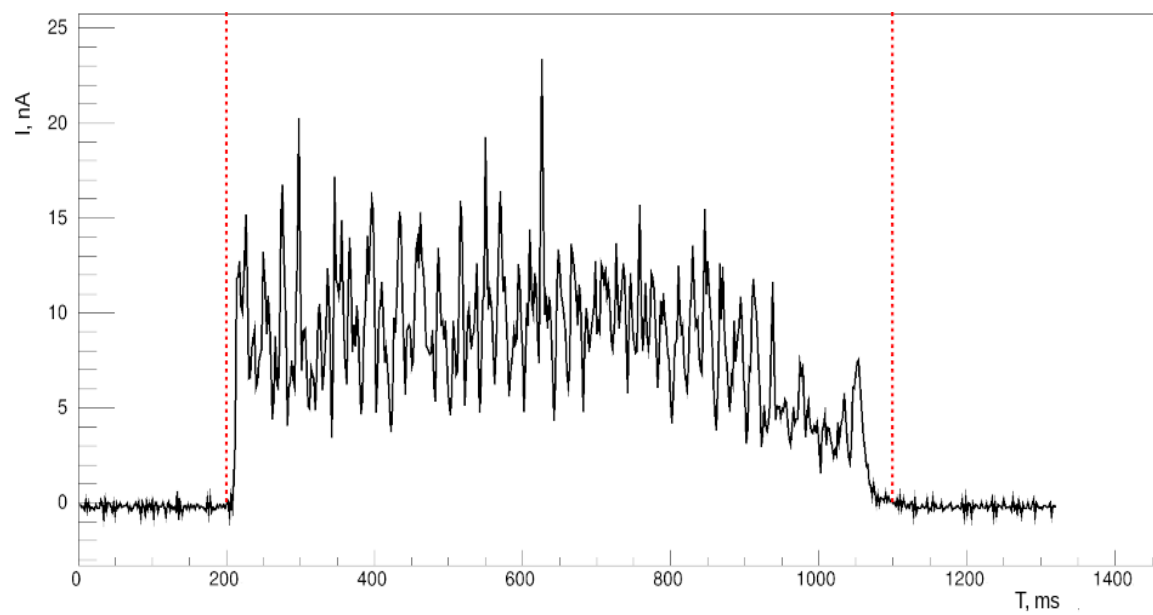


Рис. 4.

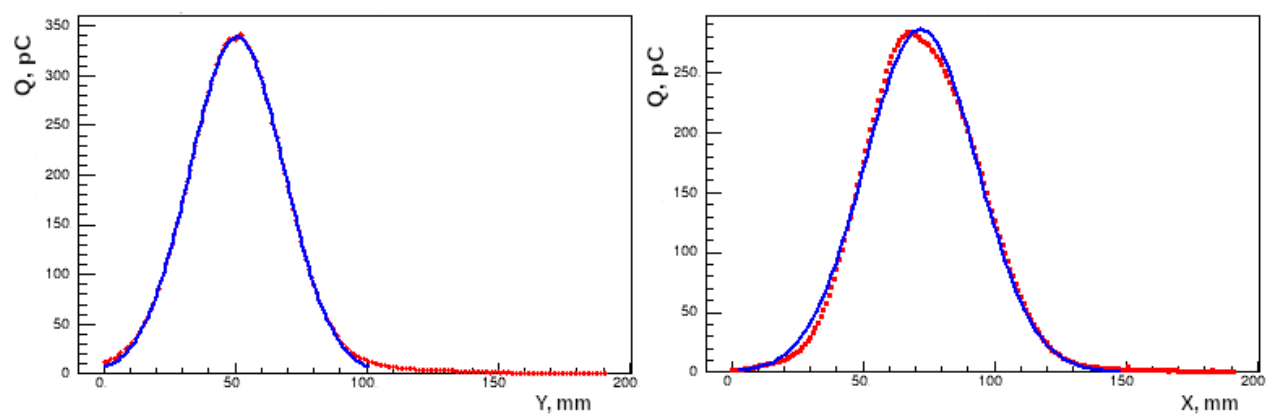


Рис. 5.

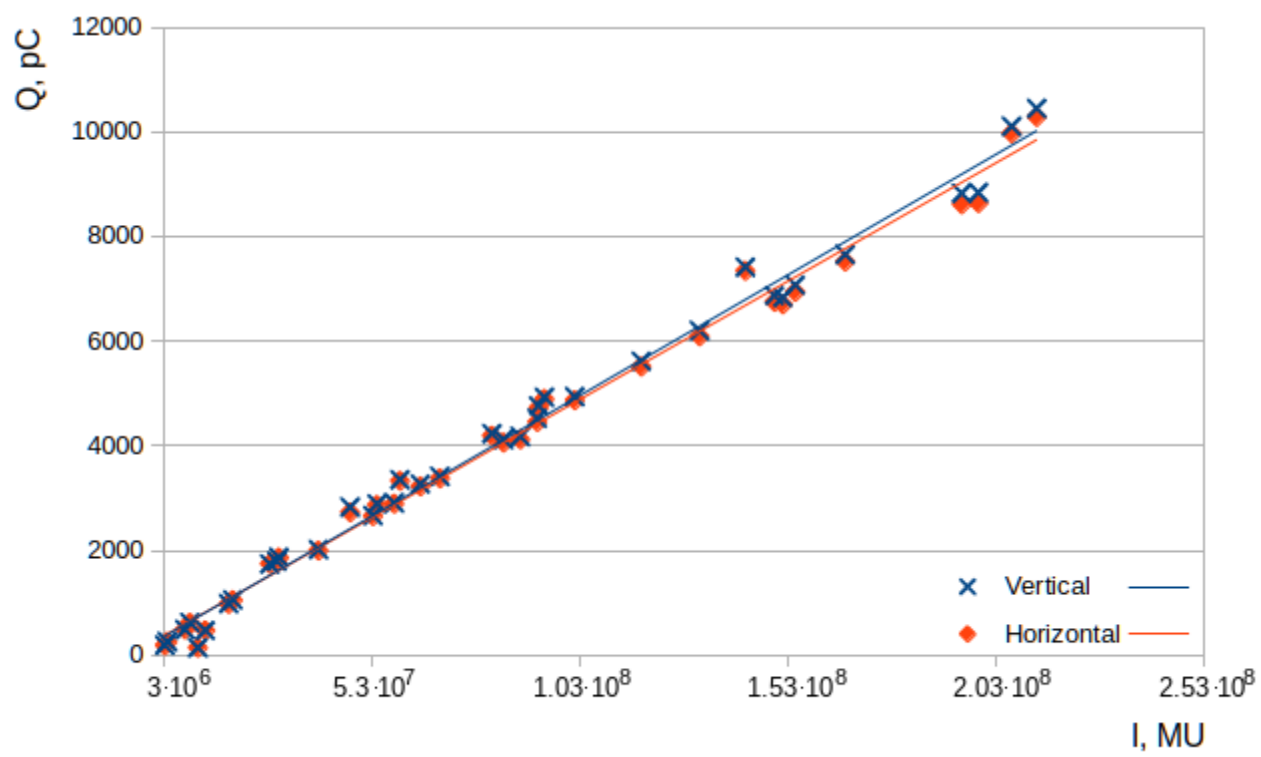


Рис. 6.