

## КОМПЛЕКТ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЛЯ ОНКООФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРОЕКТА “ОКО”

*А.В. Агапов<sup>1,2</sup>, А.Г. Валуев<sup>2</sup>, С.Е. Кулаков<sup>2</sup>, Г.В. Мицын<sup>1,2</sup>,  
А.А. Нагаенко<sup>2</sup>, С.С. Углова<sup>1</sup>, А.Е. Шемяков<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

<sup>2</sup> *АО НПО “Московский радиотехнический завод”, Москва*

<sup>3</sup> *ФТЦ ФИАН, АО “Протом”, Протвино*

## A SET OF IONIZATION CHAMBERS FOR THE ONCOOPHTHALMOLOGICAL COMPLEX OF THE “ОКО” PROJECT

*A.V. Agapov<sup>1,2</sup>, A.G. Valuev<sup>2</sup>, S.E. Kulakov<sup>2</sup>, G.V. Mytsin<sup>1,2</sup>, A.A. Nagaenko<sup>2</sup>, S.S. Uglava<sup>1</sup>, A.E. Shemyakov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

<sup>2</sup> *Moscow Radio Engineering Plant, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *FIAN, JSC “Protom”, Protvino, Russia*

### Реферат

На протяжении ряда лет в ПИЯФ НИЦ “Курчатовский институт” (г. Гатчина) на базе строящегося сильноточного циклотрона Ц-80 создается комплекс оборудования для проведения протонной терапии онкоофтальмологических мишеней (проект “ОКО”). Учитывая малые размеры облучаемых мишеней, высокую радиочувствительность органа и высокую мощность дозы излучения, к стабильности параметров протонного пучка во время облучения предъявляются повышенные требования. Практически во всех существующих установках подобного рода для этих целей используются ионизационные камеры различных конструкций, позволяющие обеспечить необходимую точность контроля характеристик пучка. Ионизационные камеры с подходящими параметрами выпускаются рядом зарубежных фирм, но в силу своей универсальности имеют очень высокую стоимость, к тому же из-за введенных в отношении России санкций в нашу страну в настоящее время они не поставляются.

В данной работе представлены результаты разработки, изготовления и испытаний комплекса оборудования на основе ионизационных камер для контроля характеристик пучка при проведении протонной терапии офтальмологических мишеней. Работа выполнена совместно сотрудниками Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, и АО НПО “Московский радиотехнический завод”, г. Москва.

**Ключевые слова:** ионизационная камера, протонная терапия, онкоофтальмология

### Abstract

For a number of years, a complex of equipment for proton therapy of oncoophthalmological targets (the OKO project) has been created at the Kurchatov Institute, Gatchina, on the basis of the high-current cyclotron C-80 under construction. Taking into account the small size of the irradiated targets, the high radiosensitivity of their localization organ and the high radiation dose rate, increased requirements are placed on the stability of the proton beam parameters during irradiation. In almost all existing installations of this kind, ionization chambers of various designs are used for these purposes to ensure the necessary accuracy of beam characteristics control. Ionization chambers with suitable parameters are produced by a number of foreign companies, but due to their versatility they have a very high cost, moreover, due to the sanctions imposed on Russia, they are not currently supplied to our country.

This paper presents the results of the development, manufacture and testing of a complex of equipment based on ionization chambers for monitoring beam characteristics during proton therapy of ophthalmic targets, which fully meets the requirements of the relevant "Technical Specifications". The work was carried out jointly by employees of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, and NPO "Moscow Radio Engineering Plant", Moscow.

**Key words:** ionization chamber, proton therapy, oncoophthalmology

E-mail: [uglova@jinr.ru](mailto:uglova@jinr.ru)

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-109-1-16-26>

## Введение

На протяжении ряда лет в ПИЯФ НИЦ "Курчатовский институт" (г. Гатчина) на базе строящегося сильноточного циклотрона Ц-80 создается комплекс оборудования для проведения протонной терапии онкофтальмологических мишеней (проект "ОКО", далее "Проект") [1]. Данный вид лечения применяется в различных центрах протонной терапии по всему миру уже достаточно давно и зарекомендовал себя с самой лучшей стороны, поэтому создание такого специализированно центра выглядит весьма перспективным [2].

Техническое оснащение таких установок имеет ряд особенностей по сравнению с центрами протонной терапии, предназначенными для лечения широкого круга опухолевых локализаций. В частности, учитывая относительно малые размеры облучаемых мишеней, высокую радиочувствительность органа и высокую мощность дозы излучения к стабильности параметров протонного пучка во время облучения предъявляются повышенные требования. Практически во всех существующих в мире установках подобного рода для этих целей используются ионизационные камеры (ИК) различных конструкций, позволяющие обеспечить необходимую точность контроля характеристик пучка. Ионизационные камеры с подходящими параметрами выпускаются рядом зарубежных фирм, но в силу своей универсальности имеют очень высокую стоимость, к тому же из-за введенных в отношении России санкций в нашу страну в настоящее время они не поставляются. Поэтому возникла задача создания таких камер из материалов и компонентов, доступных для приобретения в РФ.

В данной работе представлены результаты разработки, изготовления и испытаний комплекса оборудования на основе ионизационных камер для контроля характеристик

пучка при проведении протонной терапии офтальмологических мишеней. Работа выполнена совместно сотрудниками Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна), обладающими более чем двадцатилетним опытом эксплуатации ИК собственного изготовления [3], и АО НПО "Московский радиотехнический завод" (г. Москва).

## Материал и методы

В Проекте предусматривается формирование однородного горизонтального пучка, необходимого для облучения внутриглазных мишеней, методом однократного рассеяния и, как альтернативный вариант, с помощью воблинга узкого протонного пучка по заданной апертуре с частотой 10–20 Гц. Первый вариант является основным, поэтому далее речь будет идти именно о нем.

Обычно ионизационные камеры в радиотерапии используются для контроля пространственных характеристик пучка, а также для мониторинга (не путать с измерением) отпущаемой дозы. К первым относятся многоканальные проволочные, стриповые, пиксельные (падовые) камеры, ко вторым – плоскопараллельные камеры.

Проектом предусматривается установка на оси пучка 3 ионизационных камер: ИК1, ИК2 и ИК3. Камера ИК1 будет стоять непосредственно перед рассеивателем и контролировать пространственные характеристики падающего на него протонного пучка. Камеры ИК2 и ИК3 одинаковы по конструкции и будут установлены уже на широком пучке после сменного промежуточного коллиматора с диаметром апертуры 30–50 мм в непосредственной близости от изоцентра (места облуче-

ния). Они являются комбинированными, т.е. каждая камера содержит как стриповую часть для контроля пространственных характеристик пучка, так и мониторные плоскопараллельные электроды для мониторинга отпущаемой дозы. Первая по ходу пучка камера является контрольной, а вторая – основной, что повышает уровень гарантии качества проводимой радиотерапии. Если по каким-то причинам основная камера отработает некорректно, то ускоритель отключится по сигналу контрольной камеры.

Обработка сигналов с камеры и контроль длительности облучения (отпуска дозы) осуществляются с помощью разработанной электроники в составе системы мониторинга и диагностики пучка (СМПД), состоящей из двух модулей: модуля электрометра и модуля профилометра.

Для выбора конструкции камер важное значение имеет плотность потока частиц при штатной работе. С одной стороны, это вопрос радиационной стойкости материалов для изготовления камер, с другой стороны – при достаточно большом значении плотности потока протонов может возникнуть крайне нежелательное явление, а именно, рекомбинация образовавшихся в процессе ионизации воздуха рабочего объема камеры отрицательных (электроны) и положительных (ионы) зарядов. Это приведет к нелинейности в мониторинге дозы, что негативно скажется на точности ее ответа.

Отгалкиваясь от необходимого значения мощности дозы пучка при облучении глазных мишеней в изоцентре, а это около 0,5 Гр/с, несложный расчет дает следующие значения максимальной плотности потоков через чувствительную область камер: для ИК2 и ИК3 –  $10^9$  протонов/(с·см<sup>2</sup>), для ИК1 –  $10^{11}$  протонов/(с·см<sup>2</sup>).

### Конструкция камеры ИК1

Учитывая большие дозовые нагрузки в центральной области данной камеры, на которую будет падать пучок диаметром около 1 см, ее рабочие и защитные электроды должны быть выполнены из максимально резистентных к воздействию радиации материалов. Высоковольтные плоские электроды камеры выполнены из алюминиевой фольги, а в качестве сигнальных электродов натянуты тонкие вольфрамовые позолоченные проволочки.

По той же причине для предотвращения возникновения эффекта рекомбинации образующихся зарядов межплоскостные зазоры уменьшены до 2 мм по сравнению со стандартными 5 мм для большинства ИК, выпускаемых промышленностью.

#### Характеристики ИК1 (название – Л-02)

- ✓ Тип камеры – двухкоординатная многопроволочная ионизационная камера
- ✓ Количество проволочек – 32×32
- ✓ Количество каналов измерения – 64
- ✓ Шаг проволочек – 2 мм
- ✓ Диаметр проволочек – 30 мкм
- ✓ Материал проволочек – позолоченный вольфрам
- ✓ Чувствительная область – 64×64 мм
- ✓ Рабочая среда – воздух при нормальных условиях
- ✓ Материал защитных окон – полиимидная радиационно-стойкая пленка (Kapton)
- ✓ Максимальное подаваемое высоковольтное напряжение – 1500 В
- ✓ Габаритные размеры – 184 мм × 184 мм × 30 мм
- ✓ Материал корпуса – пластик PET-G
- ✓ Условия эксплуатации – температура от 10 до 35°C, влажность <80 %

#### Плоскости камеры по ходу пучка (рис. 1):

1. Защитное окно с заземлением. Материал: полиимид толщиной 40 мкм + алюминиевая фольга толщиной 11 мкм
2. Воздушный зазор 2 мм
3. Высоковольтная электродная плоскость (рабочая плоскость 1). Материал: алюминий

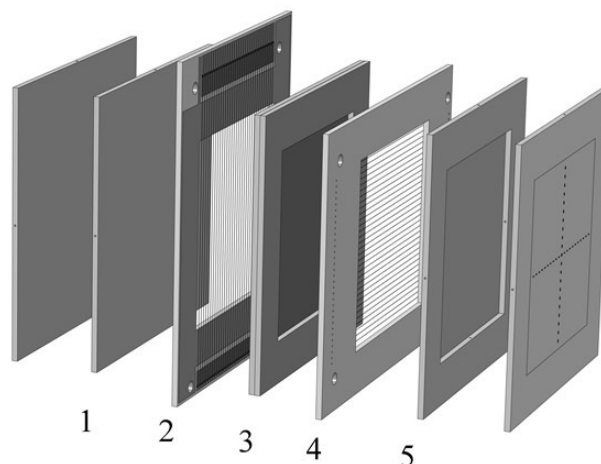


Рис. 1. Расположение плоскостей ИК1 по ходу пучка (номера указывают рабочие плоскости камеры)

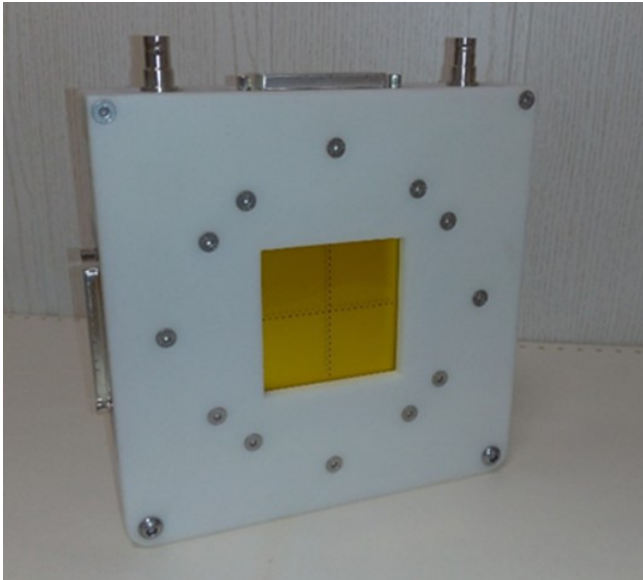


Рис. 2. Внешний вид ИК1

- вая фольга толщиной 11 мкм
4. Воздушный зазор 2 мм (рабочий объем)
  5. Сигнальная плоскость из проволочек (рабочая плоскость 2). Материал: позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм с шагом 2 мм
  6. Воздушный зазор 2 мм (рабочий объем)
  7. Высоковольтная электродная плоскость (рабочая плоскость 3). Материал: алюминиевая фольга толщиной 11 мкм
  8. Воздушный зазор 2 мм (рабочий объем)
  9. Сигнальная плоскость из проволочек (рабочая плоскость 4). Материал: позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм с шагом 2 мм
  10. Воздушный зазор 2 мм (рабочий объем)
  11. Высоковольтная электродная плоскость (рабочая плоскость 5). Материал: алюминиевая фольга толщиной 11 мкм
  12. Воздушный зазор 2 мм
  13. Защитное окно с заземлением. Материал: полиимид толщиной 40 мкм + алюминиевая фольга толщиной 11 мкм

Внешний вид камеры представлен на рис. 2. Все плоскости и электрические разъемы вставлены в корпус, изготовленный на 3D принтере из пластика PET-G.

Расчетная суммарная эффективная водоеквивалентная толщина чувствительной области камеры для протонов с энергией 70 МэВ составляет 168 мкм (без учета прохождения протона через проволочку – 97,0 % от общего

числа частиц), 450 мкм (с учетом прохождения протона через одну проволочку – 2,96 % от общего числа частиц), 740 мкм (с учетом прохождения протона через две проволочки – 0,04 % от общего числа частиц) с учетом ионизационных потерь. Средневзвешенное значение составляет  $170 \text{ мкм} \pm 5 \%$ .

Ожидаемый коэффициент преобразования заряда равен около 0,018 фКл (заряд одного знака, образовавшийся в 2 воздушных промежутках по 2 мм при прохождении одного протона с энергией 70 МэВ).

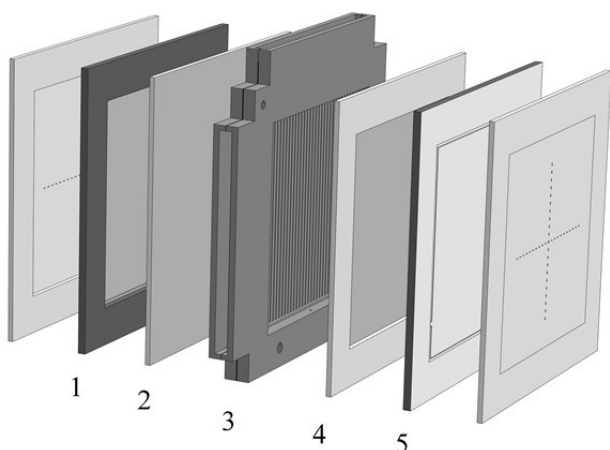
### Конструкция камер ИК2, ИК3

Для этих камер при штатной работе установки планируется умеренная дозовая нагрузка. В связи с этим было решено выполнить координатную многоканальную часть в виде стрипов из полиимидной пленки толщиной 70 мкм, фольгированной с 2-х сторон медью толщиной 10 мкм каждая. Также особенностью данной камеры является размещение стрипов по горизонтали и вертикали на единой основе из полиимидной пленки с противоположных сторон. Все рабочие зазоры камер равны 5 мм.

Корпус камеры имеет полость для установки миниатюрного сменного датчика температуры, влажности и давления ВМЕ280 (BOSCH Sensortec).

*Характеристики ИК2, ИК3 (название – Л-03)*

- ✓ Тип камеры – двухкоординатная стриповая ионизационная камера, совмещенная с двумя мониторными (токовыми) плоскопараллельными ионизационными камерами, подключенными параллельно
- ✓ Количество стрипов –  $32 \times 32$
- ✓ Количество каналов измерения –  $64 + 1$  токовый
- ✓ Шаг стрипов – 2,5 мм
- ✓ Зазор между стрипами – 0,2 мм
- ✓ Чувствительная область –  $80 \times 80$  мм
- ✓ Рабочая среда – воздух при нормальных условиях
- ✓ Основа сигнальных электродов – полиимидная радиационно-стойкая пленка (Kapton)
- ✓ Максимальное высоковольтное напряжение – до 2000 В
- ✓ Габаритные размеры –  $192 \text{ мм} \times 192 \text{ мм} \times 38,5 \text{ мм}$
- ✓ Материал корпуса – пластик PET-G
- ✓ Условия эксплуатации – температура от 10 до  $35^\circ\text{C}$ , влажность  $< 80 \%$

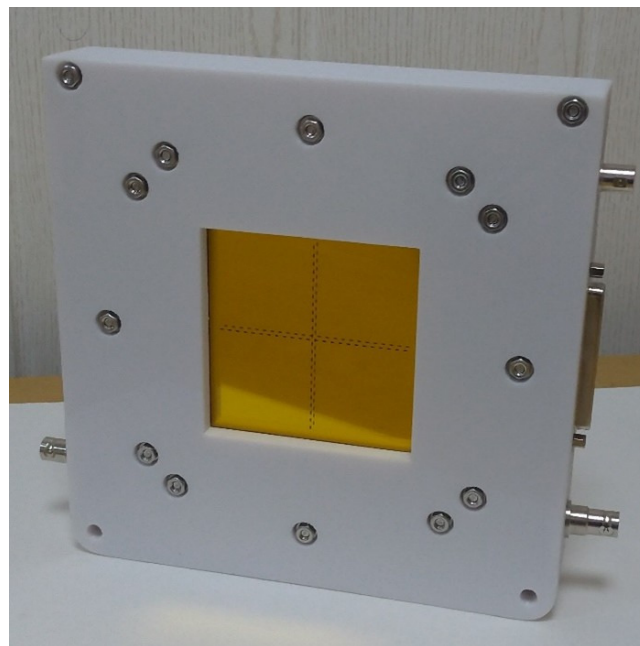


**Рис. 3.** Расположение плоскостей ИК2, ИК3 по ходу пучка (номерама указаны рабочие плоскости камеры)

#### Плоскости по ходу пучка (рис. 3)

1. Защитное окно. Материал: полиимид толщиной 40 мкм
2. Воздушный зазор 2 мм
3. Мониторная (токовая) электродная плоскость (рабочая плоскость 1). Материал: полиимид толщиной 30 мкм с односторонней алюминизацией 0,1 мкм
4. Воздушный зазор 5 мм (рабочий объем)
5. Высоковольтная электродная плоскость (рабочая плоскость 2). Материал: алюминиевая фольга толщиной 11 мкм
6. Воздушный зазор 5 мм (рабочий объем)
7. Стриповая электродная двухкоординатная плоскость (рабочая плоскость 3). Материал: полиимид толщиной 70 мкм с двухсторонне расположенными медными стрипами толщиной 10 мкм, покрытыми оловом толщиной 2 мкм
8. Воздушный зазор 5 мм (рабочий объем)
9. Высоковольтная электродная плоскость (рабочая плоскость 4). Материал: алюминиевая фольга толщиной 11 мкм
10. Воздушный зазор 5 мм (рабочий объем)
11. Мониторная (токовая) электродная плоскость (рабочая плоскость 5). Материал: полиимид толщиной 30 мкм с односторонней алюминизацией 0,1 мкм
12. Воздушный зазор 2 мм
13. Защитное окно. Материал: полиимид толщиной 40 мкм

Расчетная суммарная средневзвешенная эффективная водоеквивалентная толщина чувствительной области камеры для протонов 70 МэВ составляет 390 мкм.



**Рис. 4.** Внешний вид ИК2, ИК3

Ожидаемый коэффициент преобразования заряда равен около 0,046 фКл (заряд одного знака, образовавшийся в 2 воздушных промежутках по 5 мм при прохождении одного протона с энергией 70 МэВ).

#### Схема электрометра для монитора

В основе модуля электрометра системы мониторинга отпускаемой дозы лежит схема преобразователя ток-частота, выполненная на базе микросхем интегратора IVC102U (Texas Instruments) и компаратора AD8561 (Analog Devices) (рис. 5). Микросхема IVC102U имеет низкий входной ток смещения (единицы пА), содержит несколько переключаемых конденсаторов в обратной связи, что позволяет менять максимальный диапазон измеряемого заряда. Также она имеет два аналоговых ключа. Один из ключей в нужное время производит разряд накопительного конденсатора, в это же время второй ключ отключает вход микросхемы от входа. Во время этого импульса заряд, приходящий с камеры, накапливается на соединительном кабеле и после окончания импульса он подзаряжает накопительную емкость до нужного значения. В результате не происходит потери заряда во время сброса накопительного конденсатора, что существенно увеличивает точность измерений и увеличивает их динамический диапазон.

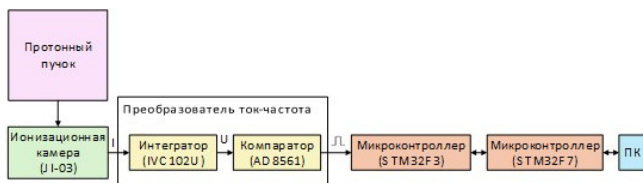


Рис. 5. Блок-схема модуля электрметра монитора отпуска дозы

Ионизационный ток с дозиметрической плоскости камеры поступает на вход блока и преобразуется в последовательность импульсов, каждый из которых в нашем случае эквивалентен примерно 40 пКл заряда с ИК.

Полученная последовательность импульсов поступает на вход микроконтроллера STM32F3 (STMicroelectronics), который по достижении необходимого наперед заданного их количества отправляет сигнал прерывания облучения в компьютер или систему управления.

**Электрметр координатной части**

Модуль профилометра построен на микросхеме DDC264 (Texas Instruments), которая представляет собой 64-канальный преобразователь поступающего на вход заряда в цифровой код, каждый канал которого имеет встроенный интегратор и АЦП (рис. 6). Ее выбор позволяет ограничиться лишь одной микросхемой, вместо применения отдельного интегратора и АЦП на каждый из каналов, что делает систему более компактной. Максимальная частота дискретизации составляет 6 кГц с разрядностью АЦП 16 или 20 бит на выбор. Минимальное время конверсии близко к 160 мкс, что в совокупности с диапазоном детектируемого заряда (12,5 пКл – 150 пКл) позволяет измерять токи от десятков фА до сотен нА. Измерения происходят в непрерывном режиме без потери входного заряда, поскольку преобразователь в каждом из каналов DDC264 дублирован.

Оцифрованные значения токов с 64 проволочек или стрипов каждой из 3 камер (зависит от типа ИК) усредняются в течение нескольких выборок (программируемое значение)

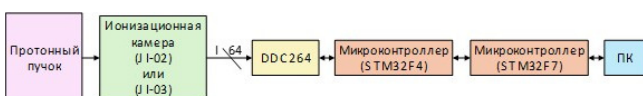


Рис. 5. Блок-схема модуля электрметра монитора отпуска дозы

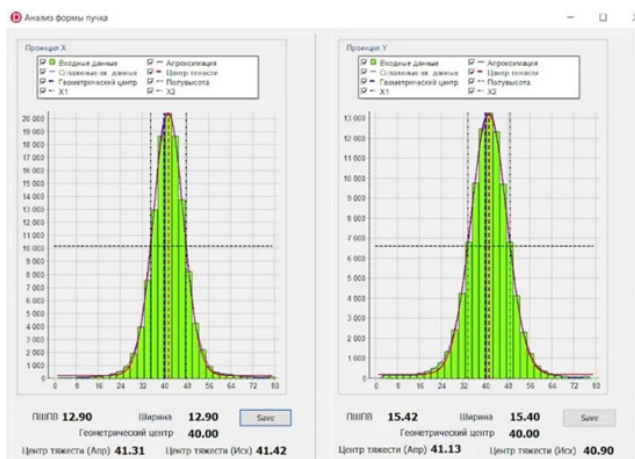


Рис. 7. Интерфейс программы обработки данных

и передаются в компьютер, где происходит обработка и визуальное отображение полученных данных в виде гистограмм. Разработанное специальное программное обеспечение позволяет аппроксимировать данные, определять полную ширину на половине высоты (ПШПВ) распределения, вычислять центр тяжести пучка (рис. 7).

Все электронные компоненты СМПД, включая источник высоковольтного напряжения, размещены в металлическом заземленном корпусе для экранирования от внешних электромагнитных помех, которые могут повлиять на измерения дозы и положения пучка (рис. 8, 9). Также для размещения электроники на безопасном расстоянии от зоны облучения, камеры подключаются к блоку с помощью экранированных кабелей длиной около 10 метров.

**Результаты испытаний**

Испытания камеры проводились на облучении комплекса протонной терапии “Прометеус” (АО “Протом”) на пучках синхротрона, способного ускорять протоны до энергий в диапазоне от 30 до 330 МэВ [4, 5].

**Измерение водозэквивалентной толщины ИК**

Для измерения суммарной эффективной водозэквивалентной толщины рабочей области камер, перекрывающей протонный пучок, использовалось следующее оборудование:

- ✓ Эталонный полевой дозиметр PTW Roos 34001 [6]

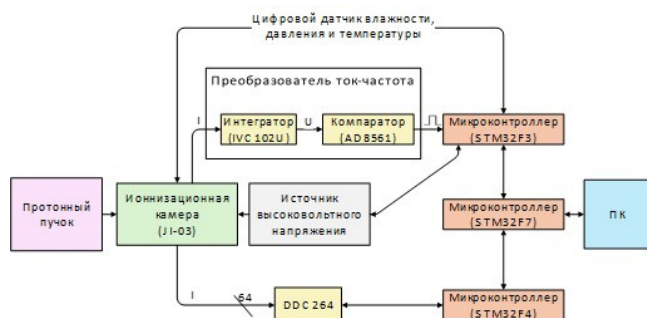


Рис. 8. Общая блок-схема комплекса диагностического оборудования (ИК и СМПД)



Рис. 9. Подключение ионизационных камер ИК2 и ИК3 к блоку СМПД

- ✓ Эталонный референсный дозиметр RTW Bragg peak 34073 [6]
- ✓ Позиционер для точного перемещения полевого дозиметра в водном фантоме производства фирмы "Протом".

Водный фантом заполнялся специальной обессоленной водой для обеспечения условий, максимально приближенных к тканеэквивалентной среде.

Исследовались следующие камеры: JI-02 (ИК1) и JI-03 (ИК2, ИК3).

Параметры протонного пучка, используемого для эксперимента, были следующими: энергия частиц – 80 МэВ, диаметр пучка – около 10 мм на ПШПВ, количество частиц в импульсе –  $10^9$ , длительность импульса – 400 мс.

Измерение глубинного распределения дозы (пика Брэгга) проводилось с использованием

водного фантома и позиционера (минимальный шаг позиционера 0,15 мм, инструментальная погрешность позиционирования  $\pm 0,075$  мм). В качестве детекторов применялись две эталонные дозиметрические камеры: референсный дозиметр, который закреплялся на выходе протонопровода, и полевой дозиметр, погруженный на позиционере в водный фантом.

Для анализа вносимого вклада ионизационных камер в суммарную толщину вещества измерения проводились в два этапа:

1. Полевой дозиметр смещался позиционером на небольшие расстояния в сторону, противоположную от протонопровода без испытываемой камеры. Фиксировались значения с двух дозиметров на каждом шаге.
2. Далее измерения повторялись, но уже с установленной перед водным фантомом поочередно каждой из испытываемых камер.

Обработка данных состояла из получения отношений сигналов полевого дозиметра к значениям референсного дозиметра для каждого шага измерения, что исключает потенциальные нестабильности интенсивности пучка во время измерений. На основе полученных данных строились кривые глубинного распределения дозы (рис. 10). Водоэквивалентная толщина камер определялась по разности пробегов на заднем спаде кривой Брэгга по уровню 50 %, где имеется максимальный градиент спада и, соответственно, наилучшая точность определения данной величины.

В результате для водоэквивалентных толщин камер были получены следующие значения: ИК1 –  $174 \pm 75$  мкм; ИК2 –  $372 \pm 75$  мкм; ИК3 –  $379 \pm 75$  мкм. Суммарная водоэквивалентная

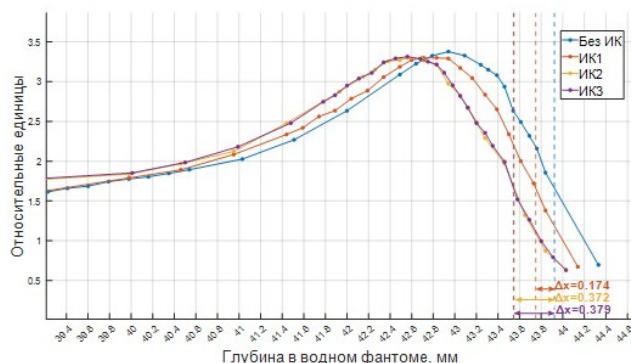


Рис. 10. Измеренные глубинно-дозовые кривые: без ИК; с проволоочной ИК1; со стриповой ИК2; со стриповой ИК3

толщина всех 3 ИК составляет 925 мкм, что соответствует требованиям ТЗ и не приводит к значительным изменениям характеристик пучка.

**Мониторирование поглощенной дозы**

В измерениях было задействовано следующее оборудование:

- ✓ Эталонный дозиметр PTW Roos 34073
- ✓ Позиционер для крепления ИК
- ✓ Ионизационные камеры ИК2 и ИК3.

Параметры протонного пучка, используемого для эксперимента: энергии протонного пучка – 30, 55, 80 МэВ; диаметр пучка – около 10 мм по ПШПВ; количество частиц в импульсе –  $5 \cdot 10^8$ , длительность импульса – 300 мс.

Для оценки точности мониторингования поглощенной дозы камерами ИК2 и ИК3 применялся метод сравнительного анализа. После цикла облучений камер при одних и тех же условиях был вычислен средний коэффициент пропорциональности между эталонным дозиметром (*ref*) и ионизационной камерой (IC) для каждой энергии протонов по формуле:

$$K = \Sigma ref / \Sigma IC.$$

Используя этот коэффициент, можно получить ожидаемые значения показаний эталонного дозиметра методом перемножения рассчитанного коэффициента на показания испытываемой камеры:

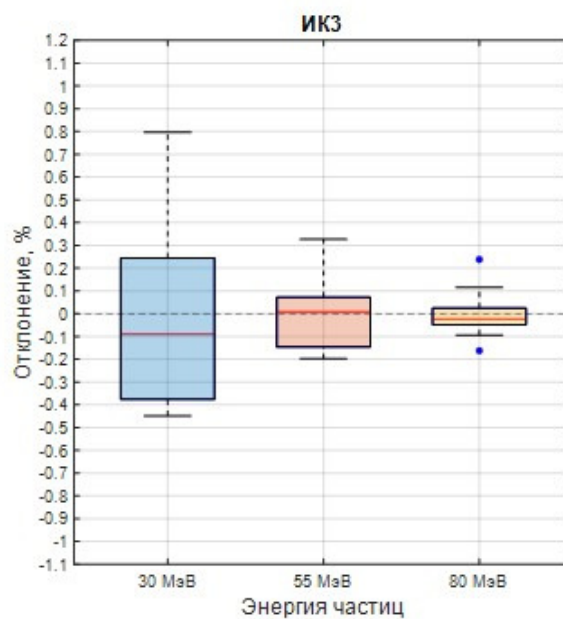
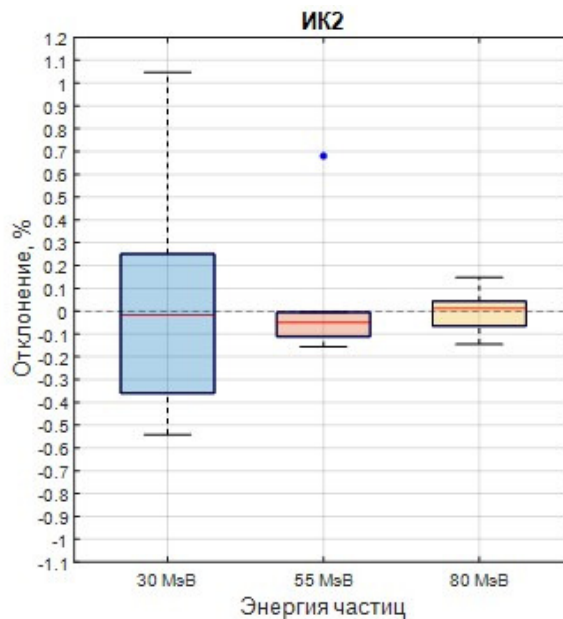
$$ref\ expected = K \cdot IC.$$

Процентное отклонение показаний ионизационной камеры от показаний эталонного дозиметра рассчитывалось следующим образом:

$$deviation = ((ref\ expected - ref) / ref) \cdot 100.$$

На рис. 11 приведены диаграммы отклонений показаний с дозиметрических плоскостей камер ИК2, ИК3 относительно показаний эталонного дозиметра в процентном соотношении для десяти циклов измерения на разных энергиях протонов. Здесь (как и на всех последующих диаграммах данного типа) представлены: медиана (красная линия внутри “ящика”), квартили  $Q_1-Q_3$  (“ящик”), минимальные и максимальные значения (“усы”) в пределах  $1,5 \times (Q_1-Q_3)$  от квартилей, и выбросы (синие точки), лежащие за пределами данного диапазона.

По результатам измерений можно сделать следующие выводы: обе ИК показали достаточно стабильные значения мониторингования дозы. Разница с показаниями эталонного



**Рис. 11.** Диаграмма размаха показаний дозиметрических плоскостей камер ИК2 и ИК3 от показаний эталонного дозиметра для 3-х энергий частиц

дозиметра составила менее 1 % для диапазона энергий пучка 30–80 МэВ. Наибольшая точность (расхождение 0,3 %) была достигнута при энергии пучка 80 МэВ, где работа ускорителя характеризуется большей стабильностью по сравнению с энергией 30 МэВ.

### Равномерность сигнала по площади чувствительного объема ИК

Для измерений было задействовано то же оборудование, что и в предыдущем разделе.

Параметры протонного пучка, используемого для эксперимента, были следующие: энергия частиц – 70 МэВ; диаметр пучка – около 15 мм по ПШПВ; количество частиц в импульсе –  $10^9$ ; длительность импульса – 800 мс.

Ионизационные камеры устанавливались на позиционер и центрировались относительно оси пучка по встроенной лазерной системе комплекса ПЛТ. Эталонный дозиметр был установлен на стационарной части позиционера таким образом, что при перемещении камеры дозиметр всегда оставался на одном и том же месте. Это позволяло вести постоянный мониторинг интенсивности пучка во время всего эксперимента.

Для измерения равномерности распределения сигнала (пространственной неоднородности) активная область ИК была поделена на 5 условных областей (рис. 12).

Первая область располагалась в геометрическом центре камеры, остальные четыре – со смещением на 15 мм от центра вдоль главных осей. Данный шаг смещения выбран исходя из поперечных размеров пучка (19 мм по уровню  $3\sigma$ ) и размеров чувствительной области камер (80 мм × 80 мм).

Для каждой области производилось по 10 измерений и после коррекции интенсивности пучка и усреднения показаний вычислялись отклонения полученных значений относительно значений, полученных в центральной области камер (табл. 1).

На основе данных из таблицы были построены графики пространственного распределения отклонений сигналов относительно центральной части камер (рис. 13), которые наглядно показывают потенциальную нестабильность измерения дозы в периферийных точках относительно центральной.

Таким образом, максимальное отклонение сигнала обеих камер по всем 4-м областям

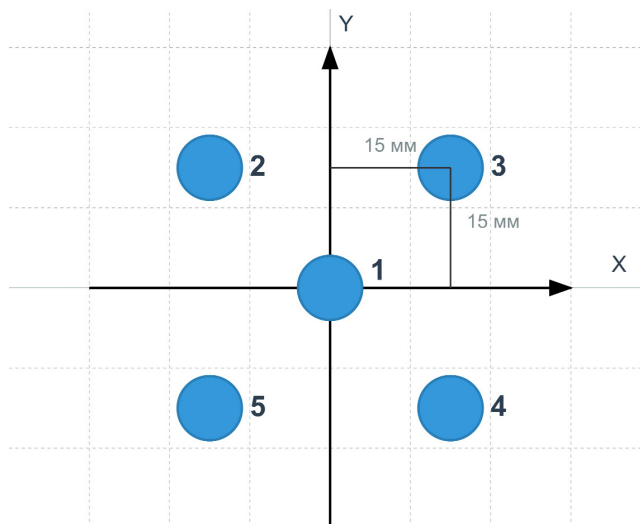


Рис. 12. Условное графическое изображение областей облучения рабочего поля ИК без привязки к реальным размерам пучка

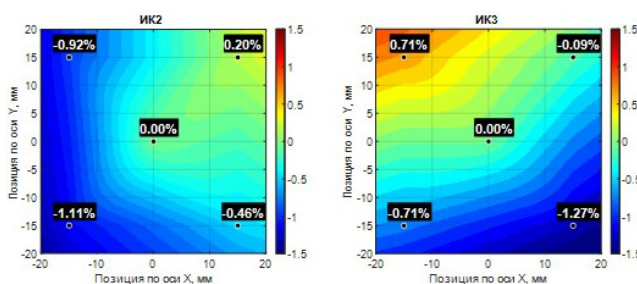


Рис. 13. Пространственное распределение (интерполяция) отклонений сигналов на периферии камер ИК2, ИК3 относительно их центра

измерений составило  $\pm 1,3\%$  от значения, полученного в центральной их области, а среднее отклонение сигнала не превысило  $-0,340 \pm 0,85\%$ , что полностью соответствует условиям ТЗ и является достаточным для мониторинга отпускаемой дозы в сеансах радиотерапии.

### Точность определения положения центра тяжести пучка

Измерения проводились в тех же условиях, но уже для всех 3 ИК.

Таблица 1

#### Отклонение уровней сигналов камер ИК2, ИК3 относительно значений в центральной части

Камера №	Поз. 2	Поз. 3	Поз. 4	Поз. 5	Среднее
ИК2	-0.92 %	0.20 %	-0.46 %	-1.11 %	$-0,57 \pm 0,58\%$
ИК3	0.71 %	-0.09 %	-1.27 %	-0.71 %	$-0,34 \pm 0,85\%$

Параметры протонного пучка, используемого для эксперимента, были следующие: энергия частиц – 80 МэВ; диаметр пучка – около 15 мм по ПШПВ; количество частиц в импульсе –  $10^9$ , длительность импульса – 800 мс.

В процессе измерений было выяснено, что позиционер может осуществлять перемещение с хорошей точностью и шагом 0,1 мм только по оси Y. При этом погрешность при перемещении на 5 мм составляет около  $\pm 0,025$  мм. По оси X минимальный шаг составляет 0,15 мм, но из-за используемого ременного привода точность при перемещении на 5 мм составляет более  $\pm 0,2$  мм.

Дополнительную погрешность в измерении вносит нестабильность положения самого пучка. По оси X она может достигать  $\pm 0,3$  мм, по оси Y – меньше  $\pm 0,1$  мм.

Для уменьшения влияния погрешности положения пучка на измерения, было принято решение осуществлять перемещение ИК только по оси Y, а для проверки точности перемещения по оси X осуществить физический поворот ИК на  $90^\circ$ . Погрешность такой оценки перемещения составила  $\pm 0,2$  мм.

Для проведения эксперимента камера смещалась относительно центра пучка на  $\pm 5$  мм с шагом 1 мм. На каждом шаге производилось несколько измерений, после усреднения результатов которых были получены соответствующие диаграммы отклонений измеренных смещений от выставленных позиционером (рис. 14).

Таким образом, ионизационные камеры с разработанной электроникой для обработки данных позволяют определять положение центра тяжести пучка с высокой точностью, максимальное наблюдаемое отклонение измеренных координат от заданных не превысило 0,19 мм, а максимальное среднее отклонение составило  $0,02 \pm 0,13$  мм. Это с большим запасом перекрывает потребности системы диагностики пучка проекта “ОКО”.

**Измерение тока утечки**

Определение тока утечки камер ИК2, ИК3 проводилось в отсутствии протонного пучка. Для этого на вход преобразователя ток-частота через сопротивление 5 ГОм параллельно с камерой был подан небольшой положительный ток смещения, чтобы на выходе появились импульсы с частотой 1 раз за несколько секунд. Это дает гарантию отсутствия порогового тока регистрации преобразователем.

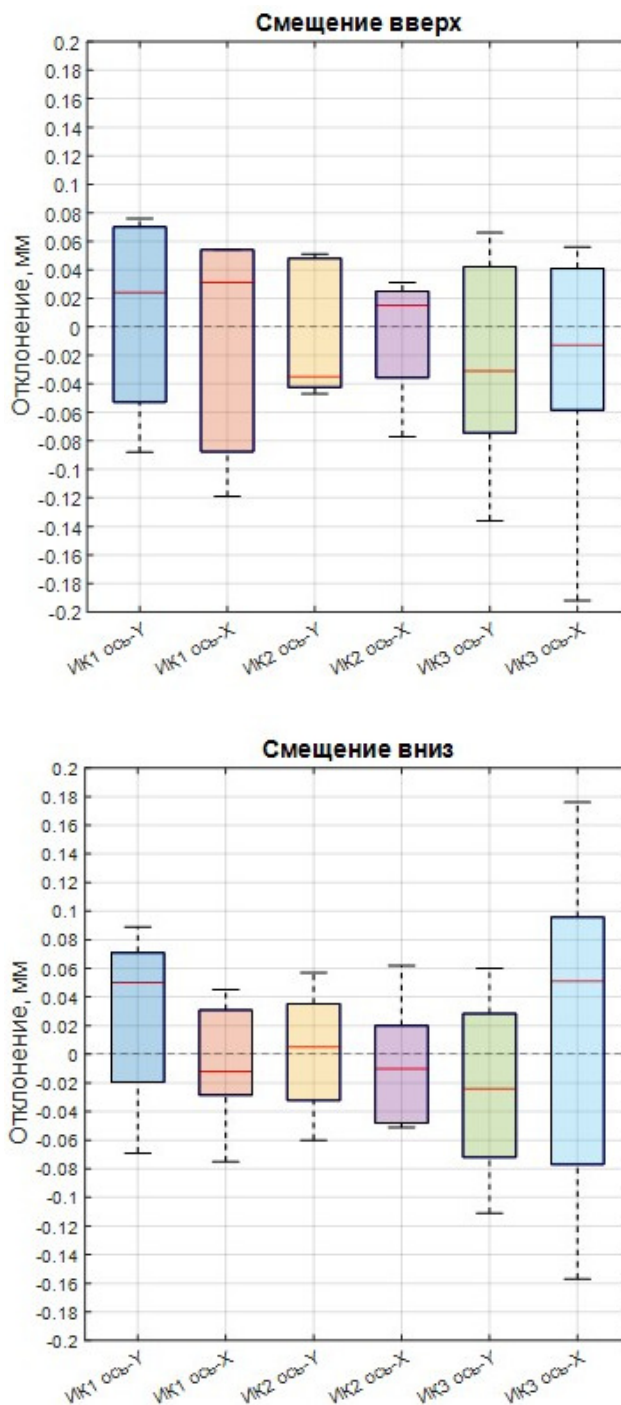


Рис. 14. Диаграмма размаха отклонений измеренной координаты центра тяжести пучка при перемещении ИК вверх и вниз с шагом 1 мм

При отключенном высоковольтном напряжении в течении 5 минут подсчитывалось количество пришедших с преобразователя импульсов. Затем на камеру подавалось напряжение и через время порядка 1–2 минуты, достаточное для окончания переходных процессов,

Таблица 2

**Основные результаты испытаний созданного комплекса оборудования  
на основе ионизационных камер**

Параметр	Результаты измерений
Суммарная водозэквивалентная толщина	925 мкм
Погрешность измерения дозы	<1,05 % (0,00±0,47 %) для 30 МэВ* <0,67 % (0,00±0,24 %) для 55 МэВ* <0,23 % (0,00±0,11 %) для 80 МэВ*
Погрешность определения равномерности сигнала по площади дозиметрической плоскости	<1,3 % (-0,340±0,85 %)*
Погрешность определения положения центра пучка	<0,19 мм (0,02±0,013 мм)*
Ток утечки мониторинговых камер	<10 пА

\* Приведены максимальные значения и средние значения ± стандартное отклонение для камер

измерение повторялось. По разности отсчетов второго и первого измерений и зная заряд, приходящийся на один отсчет (100 пКл в нашем случае), легко посчитать темновой ток камер (ток утечки). Для обеих камер он не превысил 10 пА при поданном на них номинальном напряжении 500 В, что более чем на 3 порядка меньше ожидаемого рабочего тока камер в режиме нормальной работы.

## Заключение

В результате проделанной работы был разработан, изготовлен и испытан комплекс оборудования на основе ионизационных камер для контроля характеристик пучка при проведении протонной терапии офтальмологических мишеней для проекта "ОКО", полностью удовлетворяющий требованиям ТЗ на это оборудование. Проведенные испытания системы мониторинга и диагностики пучка, состоящей из ионизационных камер и блока измерительной электроники, показали следующие результаты, представленные в табл. 2.

Созданное оборудование представляет собой готовое решение, на базе которого можно создавать более сложные системы для протонно-лучевых комплексов с повышенными требованиями к дозиметрии и точности определения положения пучка в пространстве.

## Список литературы

1. Chernykh AN, Ivanov EM, Khoroshkov VS, Klenov GI. Radiation Oncology Ophthalmic Center Based on the C-80 Accelerator at the NRC "Kurchatov Institute" - PNPI, in Proc. RU-PAC'18, Protvino, Russia, Oct 2018, pp. 145-148. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RU-PAC2018-FRCAMH03>.
2. Karpunin VO, Orlov DG, Khoroshkov VS. Ocular proton therapy: state-of-the-art. Russian Ophthalmological Journal. 2023; 16 (3): 147-51. (In Russ.) <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2023-16-3-147-151>.
3. Будяшов ЮГ, Карпунин ВО, Колонутто ПЕ и др. Система контроля параметров протонного пучка при радиотерапии. Письма в ЭЧАЯ. 2006; 3 (1): 101-10.
4. Belikhin M, Pryanichnikov AA, Shemyakov AE, Zhogolev PB, Zavestovskaya IN, Chernyaev AP. Direction and Status of Scientific Research at the Prometheus Proton Therapy Complex. Physics of Atomic Nuclei. 24 Mar; 86: 2519-22. <https://doi.org/10.1134/S1063778823110054>.
5. Balakin VE, Bazhan AI, Alexandrov VA, Chashurin VI, Lunev PA, Pryanichnikov AA, Shemyakov AE, Belikhin MA, Shestopalov AI. Updated Status of Protom Synchrotrons for Radiation Therapy. XXVII RUSSIAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE. 21 Nov. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB05>.
6. Официальный сайт компании PTW Freiburg GmbH. URL: <https://www.ptwdosimetry.com/>.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.

**Поступила:** 20.11.2025. Принята к публикации: 19.03.2026.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Financing.** The study had no sponsorship.

**Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

**Article received:** 20.11.2025. Accepted for publication: 19.03.2026.