

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

*На правах рукописи*

**Гаврилов Сергей Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ДВУМЕРНОЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ  
ДИАГНОСТИКИ ПОПЕРЕЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВ  
УСКОРЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
НА ОСНОВЕ ИОНИЗАЦИИ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Долгопрудный – Москва – Троицк, 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении Высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук

А. В. Фещенко

(ИЯИ РАН, г. Москва)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук

А. А. Балдин

(ОИЯИ, г. Дубна)

доктор физико-математических наук,  
профессор

В. И. Шведунов

(НИИЯФ МГУ, г. Москва)

**Ведущая организация:**

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 г. в \_\_\_\_\_ часов

на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01

в ИЯИ РАН по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября 7А

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета

кандидат физико-математических наук

Б. А. Тулупов

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы.**

Пучки ускоренных заряженных частиц в настоящее время активно используются не только в ядерной физике и физике высоких энергий, но и находят все более широкое применение в биологии, медицине и физике твердого тела.

Проблема измерения параметров пучков возникла в экспериментальной ядерной физике с момента открытия радиоактивного распада ядер. Однако наиболее интенсивное развитие методов диагностики пучков связано с созданием ускорителей заряженных частиц. Для обеспечения заданных параметров пучка на выходе ускорителя, а также для исследования динамики пучка непосредственно в процессе ускорения требуется измерять самые различные параметры в зависимости от принципа ускорения и типа ускорителя (энергия, ток, распределение плотности тока по сечению, поперечные и продольные размеры, энергетический спектр, эмиттанс и др.)

Для получения информации о параметрах пучка используются детекторы, различающиеся не только физическим принципом действия, но и степенью сложности, и способом обработки данных для их дальнейшего использования в автоматизированных системах управления ускорителем. Оптимальный выбор диагностического оборудования является достаточно сложной задачей, поэтому существует тенденция проектирования конкретных систем диагностики ускорителя на основе минимального количества разнородных детекторов.

Несмотря на большое количество существующих приборов диагностики, в настоящее время остается актуальным вопрос о разработке новых многопараметрических детекторов, способных работать в широком динамическом диапазоне и обладающих высокой помехоустойчивостью. Особое место в таких разработках занимают приборы для неразрушающей диагностики, позволяющие проводить измерения без возмущений исследуемого пучка, что особенно актуально для ускорителей с высокой интенсивностью пучка.

### **Цель работы.**

Настоящая работа посвящена исследованию метода неразрушающей двумерной поперечной диагностики пучков на основе ионизации остаточного газа в вакуумной камере ускорителя и решает три взаимосвязанных задачи:

1. Многопараметрический анализ исследуемого метода диагностики.
2. Анализ и усовершенствование систем Ионизационного монитора поперечного сечения пучка, работающего на основе исследуемого метода.
3. Экспериментальные исследования параметров пучков на ускорителе.

### **Научная новизна и практическая ценность работы.**

В работе исследован метод неразрушающих оперативных измерений двумерных поперечных сечений пучков ионизирующих излучений: проведен многопараметрический анализ метода в широком диапазоне токов, энергий и типов частиц, определены области его преимущественного применения и усовершенствована практическая реализация, на основе чего экспериментально подтверждены ранее предсказанные возможности метода в новых диапазонах токов и энергий.

Ионизационные мониторы поперечного сечения пучка, работающие на основе исследуемого метода, установлены на канале инжекции и на выходе сильноточного ускорителя ИЯИ РАН и используются для оперативного обобщающего неразрушающего контроля в широком динамическом диапазоне по току пучка. При этом обеспечена возможность непрерывной работы Мониторов в условиях радиационного фона и помех от высокочастотных устройств сильноточного линейного ускорителя, а также экспериментально показана возможность использования систем Ионизационного монитора для неразрушающих измерений поперечного эмиттанса низкоинтенсивных протонных пучков и поперечной диагностики по свечению остаточного газа.

### **Личный вклад автора.**

1. Выполнен многопараметрический анализ особенностей метода неразрушающей двумерной поперечной диагностики пучков на основе ионизации остаточного газа в вакуумной камере ускорителя в широком диапазоне токов, энергий и типов частиц.
2. Проведены экспериментальные исследования особенностей эксплуатации Ионизационного монитора в условиях радиационного фона сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН, а также осуществлены анализ и практическое усовершенствование конструкции радиационной защиты телевизионной системы съема и обработки получаемых изображений.
3. Проведен анализ и определены методы минимизации погрешностей Ионизационного монитора поперечного сечения пучка, на основе чего предложена усовершенствованная конфигурация детектора, принятая к разработке для форинжектора комплекса NICA ОИЯИ.
4. На основе проведенных исследований, реализованных усовершенствований и опыта эксплуатации детектора разработана компьютерная программа, позволяющая осуществлять оценку возможности использования Ионизационного монитора для диагностики пучков с круглым поперечным сечением и давать рекомендации к его применению на других ускорителях.

При непосредственном участии автора:

5. Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее значительно расширить возможности системы съема видеоданных и других систем, входящих в состав детектора, а также усовершенствовать цифровую обработку получаемых изображений.
6. Получены изображения двумерного поперечного сечения пучка протонов с энергией в сотни МэВ от низкоинтенсивного тока протонов.
7. Экспериментально показана возможность применения метода двумерной неразрушающей диагностики для измерений эмиттанса низкоинтенсивных протонных пучков.
8. На канале инжекции линейного ускорителя ИЯИ РАН экспериментально показана возможность использования систем Ионизационного монитора поперечного сечения для другого типа поперечной диагностики пучка – измерения профилей по свечению остаточного газа.
9. Обеспечен оперативный неразрушающий контроль поперечных параметров пучка на выходе линейного ускорителя ИЯИ РАН в широком динамическом диапазоне (5 мкА, 7 мкс ÷ 10 мА, 120 мкс).

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Многопараметрический анализ метода двумерной ионизационной диагностики пучков.
2. Анализ и способы минимизации погрешностей метода на примере Ионизационного монитора поперечного сечения пучка.
3. Результаты экспериментальных исследований параметров пучков на линейном ускорителе ИЯИ РАН.

#### **Связь с научными программами.**

Работа поддержана следующими грантами:

1. «Мой первый грант» РФФИ – соглашение №12-02-31006 «Исследование пределов применимости двумерной ионизационной диагностики пучков заряженных частиц на ускорителях» (руководитель работ: С. А. Гаврилов).
2. Мероприятие 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» – соглашение № 14.132.21.1447 «Неразрушающая диагностика низкоинтенсивных пучков для протонной терапии» (руководитель работ: С. А. Гаврилов).

Работы по численному моделированию электростатических систем Ионизационного монитора проводились в рамках стажировки в Oak Ridge National Laboratory, USA.

### **Апробация работы и публикации.**

Результаты исследований были представлены в виде докладов на Научных школах МИФИ и МФТИ, Всероссийских конференциях RuPAC и Международных конференциях по линейным ускорителям LINAC и ускорительной диагностике DIPAC и IBIC.

Всего по теме диссертации опубликовано 13 работ. Сущность и новизна исследований изложены в следующих основных статьях, опубликованных при определяющем вкладе С. А. Гаврилова в журнале, включенном в Перечень ВАК (Problems of Atomic Science and Technology [включен в Web of Science / Web of Knowledge, Scopus]):

1. Рейнгардт-Никулин П., Гаврилов С. и др. Развитие ионизационного монитора поперечного сечения протонного пучка линейного ускорителя ИЯИ РАН. Вопросы атомной науки и техники (Problems of atomic science and technology), 2010, т. 2(66), с. 39 – 43 .
2. Гаврилов С. и др. Перспективы использования ионизационного монитора поперечного сечения пучка на ускорителях FRIB Michigan State University и У-70 ИФВЭ. Вопросы атомной науки и техники (Problems of atomic science and technology), 2012, т. 3(80), с. 19 – 23.
3. Гаврилов С. и др. Защита электроники ионизационного монитора поперечного сечения пучка от радиационных повреждений на линейном ускорителе ИЯИ РАН. Вопросы атомной науки и техники (Problems of atomic science and technology), 2012, т. 3(80), с. 218 – 222.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 116 страниц, включая 68 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 50 наименований.

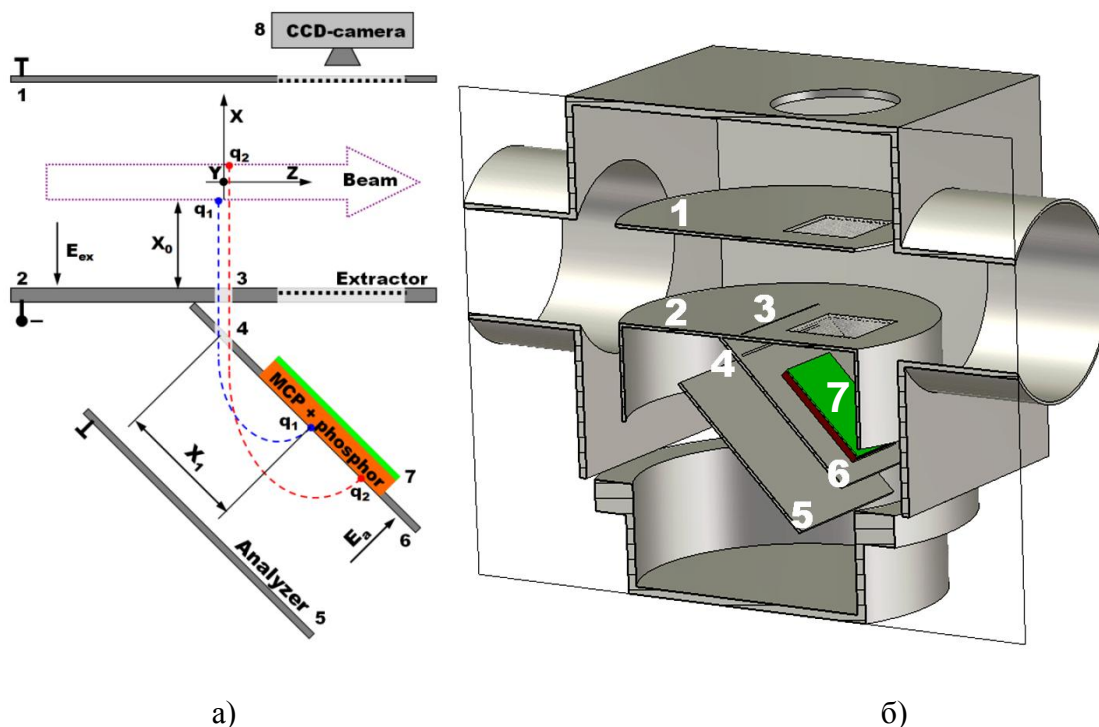
### **Содержание работы**

Во **Введении** излагаются актуальность, цель, научная новизна и практическая ценность работы; раскрывается личный вклад автора, перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные о публикациях и апробации работы.

В **первой главе** приведен обзор современных детекторов, работающих на основе эффекта ионизации остаточного газа в вакуумной камере ускорителя. Приведены основные факторы, принимающиеся во внимание в процессе разработки подобного

диагностического оборудования. Описаны основные типы ионизационных профилометров: поперечные одномерные и двумерные, а также монитор продольного распределения плотности пучка. На основе параметров существующих детекторов, сделана попытка упорядочить основные рабочие характеристики и особенности конфигурации использования ионизационных профилометров как класса инструментов неразрушающей диагностики пучков частиц на ускорителях.

Во **второй главе** приводится схема и описание принципа работы Ионизационного монитора поперечного сечения (ИМПС) пучка (Рис. 1).



**Рис. 1.** Схематическое изображение (а) и трехмерная модель (б) ИМПС.

1, 2 – электроды извлекающего конденсатора; 3, 4 – щели, прорезанные в пластинах извлекающего и анализирующего конденсатора; 5, 6 – электроды анализирующего конденсатора; 7 – электронно-оптический преобразователь, состоящий из микроканальных пластин и люминесцентного экрана; 8 – ПЗС-видеокамера.

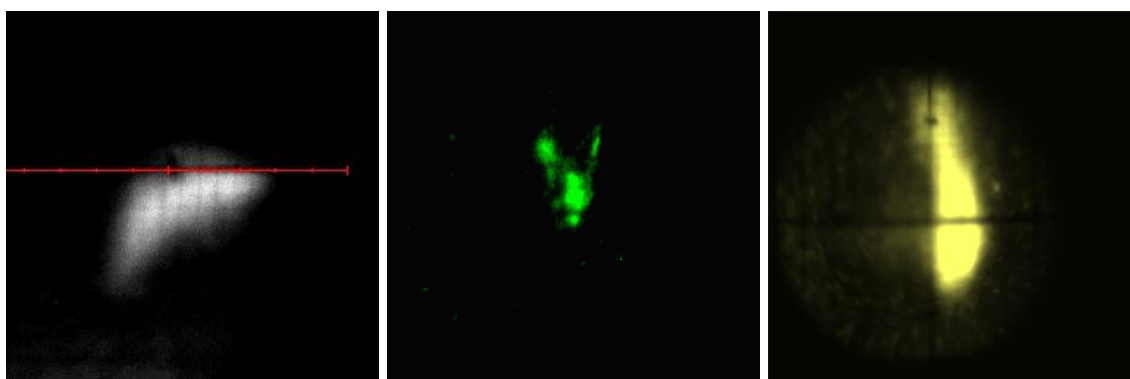
Исследуемый первичный пучок протонов проходит через область квазиоднородного электростатического поля  $E_{ex}$ , формируемого плоскими круговыми электродами 1 и 2 радиусом 6 см с потенциалами соответственно: 0 В и до  $-10$  кВ, и взаимодействует с молекулами остаточного газа. Образующиеся вторичные положительные ионы движутся в этом извлекающем поле перпендикулярно направлению распространения пучка и проходят через щель шириной  $L_{SLIT} = 1$  мм по оси Z, образуя ленточный пучок.

Ионы  $q_1$  и  $q_2$ , образовавшиеся в точках пространства с разными координатами  $X_0$ , при прохождении щели имеют разную энергию, поэтому распределение ионов по энергиям в ленточном пучке соответствует распределению частиц в исследуемом

первичном пучке по оси  $X$ . При этом распределение по координате  $Y$  совпадает с распределением плотности частиц в первичном пучке, как в одномерных ионизационных профилометрах.

Далее ленточный пучок вторичных ионов проходит через щель 4, имеющую в направлении оси  $Z$  размер, равный размеру щели 3, и попадает в квазиоднородное электростатическое поле  $E_a$  анализатора по энергиям, формируемое прямоугольными электродами 5 и 6, установленными под углом  $45^\circ$ . Потенциал электрода 6 равен потенциалу электрода 2, а электрод 5 заземлен, как и электрод 1.

В зависимости от энергии ионы попадают на вход электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 7 с различным смещением  $X_1$  относительно щели 4. ЭОП состоит из шевронной сборки микроканальных пластин (МКП) с усилением до  $10^6$  и люминесцентного экрана, на котором и формируется двумерное оптическое изображение (Рис. 2) поперечного сечения исследуемого пучка (ПСП), регистрируемое с помощью ПЗС-видеокамеры 8. Входная поверхность МКП ЭОП расположена в плоскости поверхности электрода 6 и имеет такой же потенциал.



**Рис. 2.** Примеры сложных поперечных сечений пучка, измеренных ИМПС в процессе настройки ускорителя ИЯИ РАН.

Приводится анализ движения ионов остаточного газа в детекторе и формулируется расчетная модель динамики ионов в ИМПС. Описываются используемые модели пространственного заряда для несгруппированного и сгруппированного пучка в приближении эллипсоида вращения с параболическим распределением заряда. Приводится описание компьютерной программы, созданной на основе используемых моделей. Программа позволяет осуществлять оценку возможности использования Ионизационного монитора для диагностики пучков с круглым поперечным сечением и давать рекомендации к его применению на других ускорителях.

Значительная часть главы посвящена анализу разрешения, чувствительности, разрешающей способности и погрешностям измерений Ионизационного монитора. Показывается вклад неоднородностей электростатических полей в детекторе,

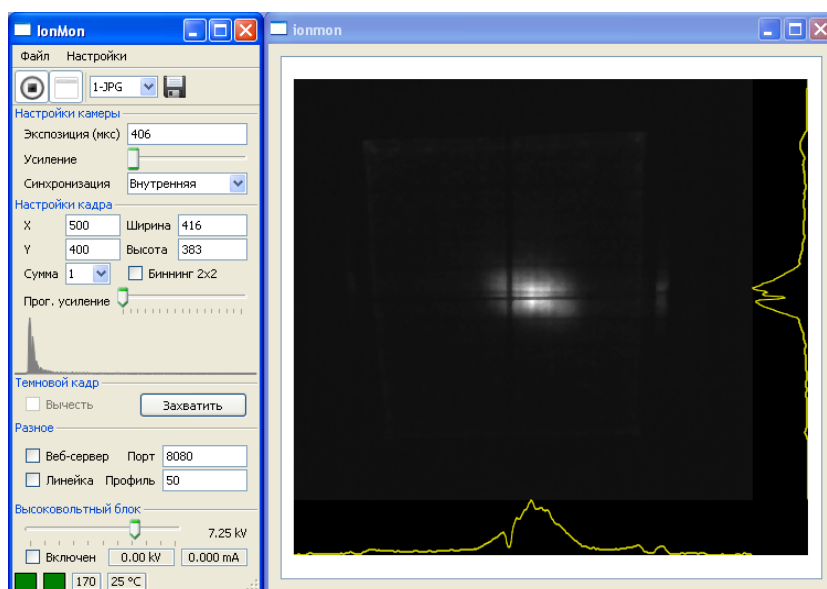


пространственного заряда исследуемого пучка и других внешних и внутренних факторов, связанных как с техническими особенностями детектора, так и самим методом двумерной ионизационной диагностики.

**Третья глава** посвящена особенностям практической реализации Ионизационного монитора поперечного сечения на линейном ускорителе ИЯИ РАН.

Изображение поперечного сечения пучка протонов с энергией 209 МэВ ЛУ ИЯИ регистрируется с помощью цифровой телевизионной системы Видеоскан-285. Система состоит из цифровой ТВ-камеры на ПЗС-матрице Sony ICX285AL, оптоволоконного кабеля с интерфейсными устройствами и платы захвата телевизионного кадра. Возможности существующего программного обеспечения используемой видеосистемы оказываются недостаточными для задач восстановления профиля пучка из регистрируемых изображений поперечных сечений. В связи с этим, было разработано специализированное программное обеспечение, которое не только упростило процедуру управления параметрами ИМПС, такими как высоковольтное питание и длительность экспозиции, но и улучшило итоговое отношение сигнала к шуму.

Использование новых программных функций обработки кадра позволяет существенно уменьшить влияние шумов системы и компенсировать искажения ПСП и профилей, вызванные горячими пикселями, даже при увеличении длительности экспозиции до 1 с, что дает возможность использовать ИМПС для измерения параметров пучков малой интенсивности. Рабочее окно программы представлено на рис. 3.



**Рис. 3.** Окно программы с панелью управления ИМПС.

Взаимодействие ускоренных частиц ореола пучка с элементами ионопровода линейного ускорителя приводят к возникновению потоков нейтронов и гамма-квантов, вызывающих повреждения и сбои в чувствительной к радиации электронике ИМПС (ПЗС-

видеокамера, АЦП и пр.). В процессе перенастройки ускорителя для различных экспериментов и прикладных работ возможно изменение интенсивности пучка в  $10^5$  раз ( $1 \text{ нА} \div 100 \text{ мкА}$  среднего тока), что приводит к пропорциональному изменению, как яркости регистрируемых изображений поперечного сечения пучка, так и потерь. Следовательно, при высокой интенсивности пучка необходимо обеспечить защиту электроники, а при низкой – сохранить чувствительность детектора.

Для выполнения всех этих противоречивых требований был разработан и установлен на ЛУ зеркально-линзовый тракт, собирающий и выводящий оптическое изображение ПСП с люминофора детектора на ТВ-камеру за бетонную защиту (толщина 70 см) зала ЛУ без существенной потери светового потока регистрируемого излучения.

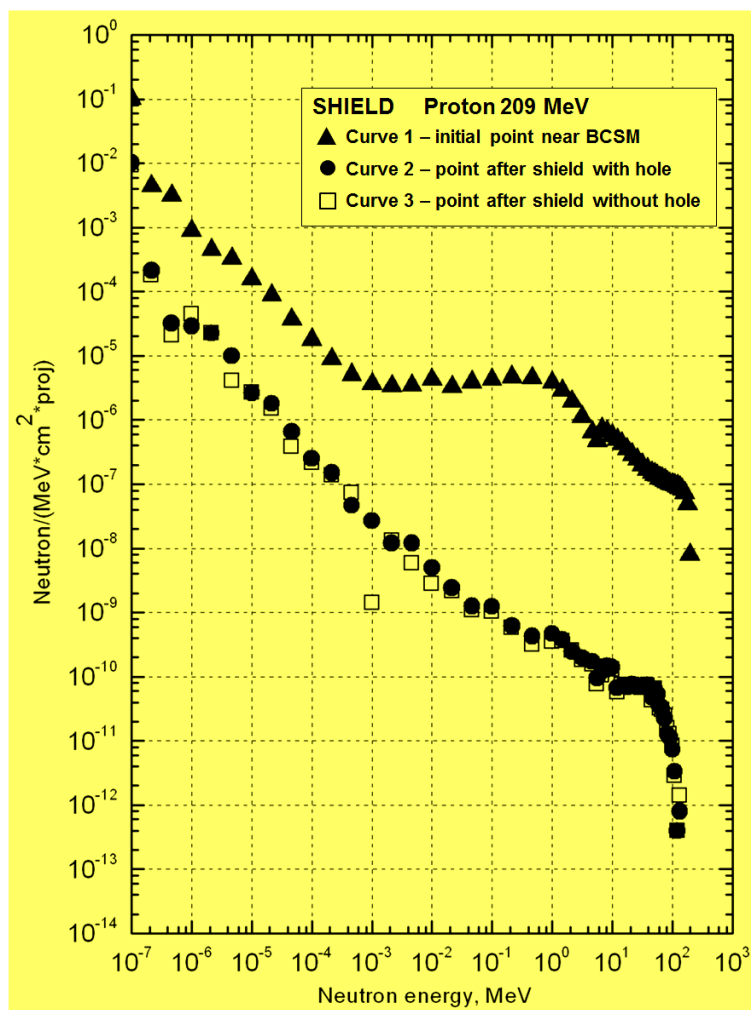
Увеличение расстояния между камерой и протонным пучком и наличие бетонной защиты позволяет снизить эффекты бомбардировки ПЗС-матрицы нейтронами и убрать ее засветку  $\gamma$ -квантами. Тем не менее, основную опасность для ПЗСМ за бетонным полом представляет остаточный поток нейтронов, вызывающий локальные разрушения структуры пикселей полупроводниковой ПЗС-матрицы. Так как порог ядерных реакций лежит примерно в районе 10 МэВ, то опасность для ПЗС-матрицы и электроники ТВ-камеры представляют нейтроны с энергией выше 10 МэВ.

Общий эффект взаимодействия нейтронного потока с электроникой за защитой определяется как жесткой, так и мягкой компонентами нейтронного потока. Причем влияние мягкой компоненты усиливается из-за наличия существующего отверстия в бетонной защите. В связи с этим необходима оценка ослабления нейтронного потока с учетом имеющегося энергетического спектра распределения нейтронов и существующей геометрии всего эксперимента. Такая оценка была проведена при помощи адронного транспортного кода SHIELD. Результаты моделирования спектральной плотности потока нейтронов в пересчете на одну первичную частицу пучка представлены на рис. 4.

Полный поток нейтронов в точке установки ТВ-камеры в непосредственной близости от вакуумного бокса Ионизационного монитора (Кривая 1) равен  $2.8 \cdot 10^5 \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при средней энергии нейтронов 47 МэВ. В точке установки ПЗС-видеокамеры за бетонной защитой (Кривая 2) полный поток равен  $67 \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при средней энергии нейтронов 21 МэВ.

Из полученных результатов моделирования видно, что массивная бетонная защита ослабляет нейтронный поток, попадающий на ТВ-видеокамеру, примерно в 4200 раз, что хорошо подтверждает теоретические оценки, сделанные выше.

Также, для сравнения, представлены результаты моделирования при отсутствии отверстия в бетонной защите (Кривая 3). В данном случае полный поток составил бы  $61 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{с})$  при средней энергии нейтронов 23 МэВ.



**Рис. 4.** Спектральная плотность потока нейтронов, рассчитанная в SHIELD.

Таким образом, можно видеть, что наличие отверстия в защите практически не влияет на конечный результат и сказывается только на небольшом усилении мягкой компоненты нейтронного потока.

Наблюдаемое повреждение пикселей говорит о том, что ПЗС-матрица является наиболее радиационно-чувствительной частью ИМПС, для которой, в случае эксплуатации в условиях радиационного фона сильноточного линейного ускорителя, необходимо разрабатывать специализированную защиту. При этом, размещение местной защиты вокруг ТВ-камеры, находящейся в 40 см от оси пучка, мало изменяет скорость набора повреждений, так как на ПЗСМ продолжают попадать вторичные нейтроны, протоны и  $\gamma$ -кванты, направленные перпендикулярно оси ионопровода. Следовательно, только перемещение ПЗСМ за защиту, блокирующую  $\gamma$ -фон и уменьшающую нейтронный

фон до уровня порядка  $10^2$  n/(см<sup>2</sup>·с), позволяет использовать данный тип ТВ-камер для исследуемого метода и обеспечить долгосрочную работоспособность Монитора, по крайней мере, в пределах гарантийного срока эксплуатации используемой электроники.

Наблюдения последовательности изображений ПЗС-матрицы при различных экспозициях показали, что горячие пиксели восстанавливаются при переходах от длинных экспозиций ( $\geq 1$  с) к коротким ( $\leq 200$  мкс). Следовательно, на коротких экспозициях матрицу можно использовать в подобных радиационных условиях без необратимого повреждения пикселей. Однако короткие экспозиции, без дополнительной защиты, не дают гарантию длительной бесперебойной работы, так как радиационная стойкость пикселей ПЗСМ не является универсальной величиной и зависит от технологических условий изготовления каждого отдельного экземпляра матрицы.

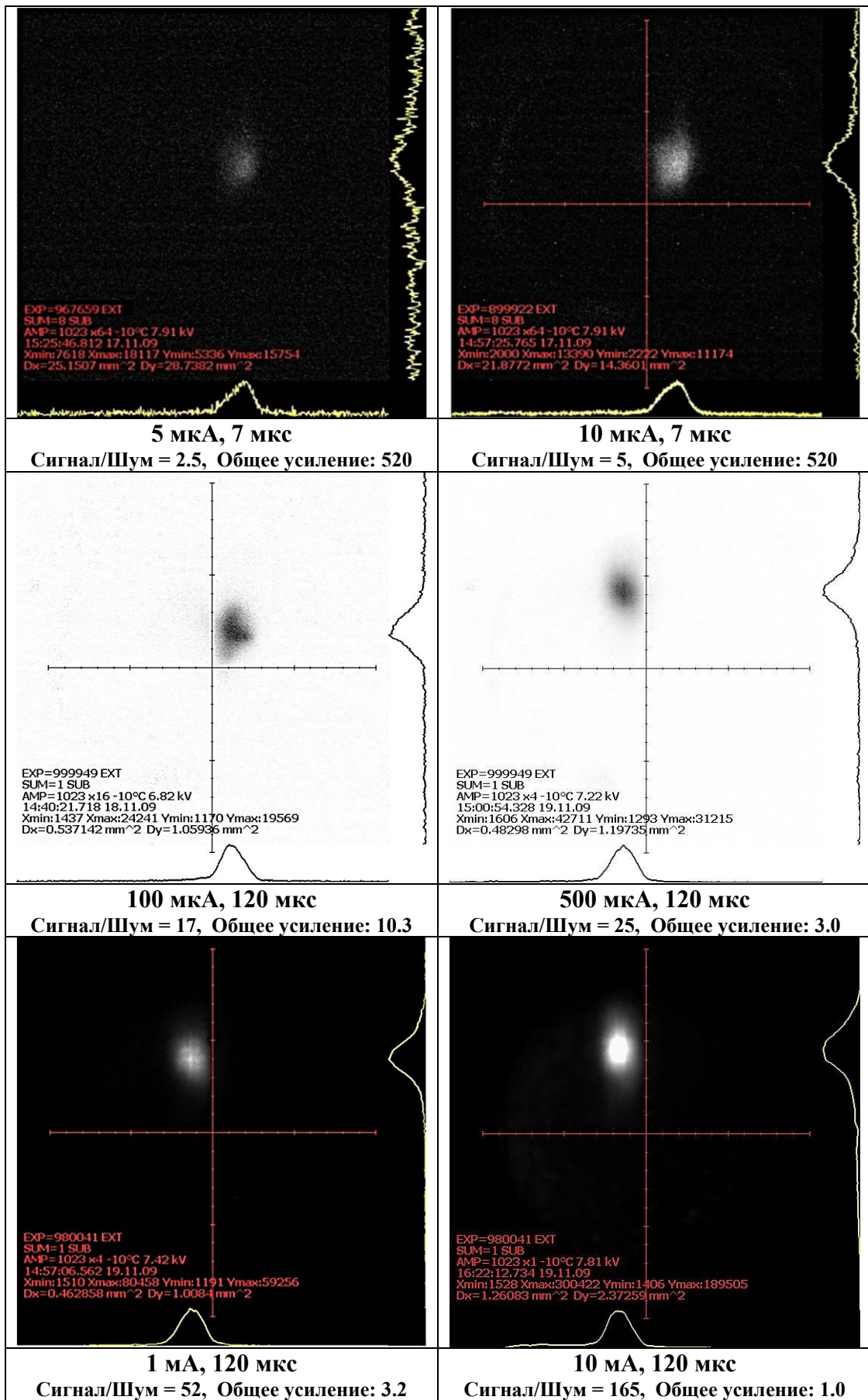
Необходимо отметить, что использование новых разработанных программных функций для анализа регистрируемых ПСП позволяет минимизировать погрешности, вызываемые радиационным фоном, и повысить в десятки раз отношение сигнал/шум даже в случае недостаточной защиты или ее отсутствия, что может быть использовано при необходимости срочных однократных измерений.

В четвертой главе описаны экспериментальные результаты использования Ионизационного монитора для диагностики параметров пучков на ускорителе ИЯИ РАН.

В ходе экспериментов на ускоренном пучке протонов ЛУ ИЯИ РАН были получены изображения поперечного сечения пучка протонов с энергией в сотни МэВ (209 МэВ) в широком диапазоне импульсных токов протонов (Рис. 5).

Разработка специального программного обеспечения и перенос ПЗС-видеокамеры за бетонную защиту позволили увеличить время бесперебойной работы Монитора и повысить аппаратную чувствительность метода. Это дало возможность перейти как к регистрации интенсивных пучков для нейтронных источников ИЯИ РАН, так и медицинских протонных пучков низкой интенсивности вплоть до 1 нА среднего тока, при давлении остаточного газа в ионопроводе не хуже  $10^{-6}$  Торр.

Наименьший ток, который удалось зарегистрировать при соотношении сигнал/шум = 2.5 и общем усилении чувствительности всех систем ИМПС в 520 раз от номинального значения, составил 5 мкА при длительности импульса 7 мкс. Максимальный зарегистрированный ИМПС ток был ограничен параметрами ЛУ ИЯИ РАН и составил 10 мА при длительности импульса 120 мкс – при этом было достигнуто соотношение сигнал/шум = 165 без использования разработанных возможностей по усилению чувствительности детектора.



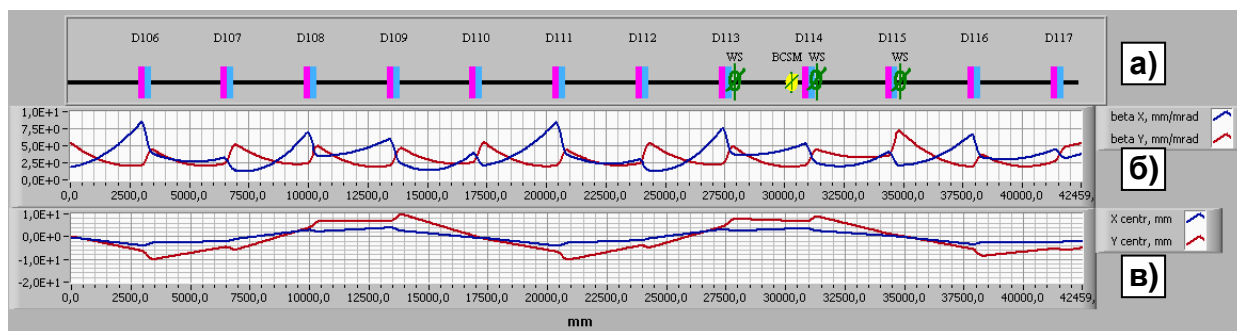
**Рис. 5.** Изображения поперечных сечений одиночных импульсов протонов с энергией 209 МэВ при давлении остаточного газа в ионопроводке  $1 \cdot 10^{-6}$  Торр.

Кроме того, ИМПС может быть использован не только для определения профилей и положения центра тяжести пучка, но и для восстановления поперечного эмиттанса, а также определения и коррекции положения центра пучка на фазовой плоскости.

Измерения эмиттанса пучка на выходе ускорителя ИЯИ РАН производятся методом поперечных сечений, который может быть основан как на измерениях поперечного профиля пучка в нескольких точках по длине ускорителя, так и на измерениях нескольких поперечных профилей пучка в одной точке при изменении набега фазы поперечных колебаний пучка в этой точке.

Измерения эмиттанса проводились при изменении полей 8 дублетов квадрупольных линз, запитанных последовательно от одного источника тока, относительно номинального значения на  $\pm 20$  А с шагом 5 А. При этом достигалось достаточное изменение набега фазы поперечных колебаний пучка. На рис. 6а показана магнитооптическая схема участка ЛУ ИЯИ РАН, на котором проводились измерения эмиттанса: D106 – D113 – 8 последовательно запитанных дублетов, WS – проволочные детекторы профиля пучка (ДПП), BCSM – Ионизационный монитор поперечного сечения пучка.

Для сравнения метода двумерной неразрушающей диагностики со стандартным разрушающим методом, используемым на ускорителе ИЯИ РАН, измерения эмиттанса дополнительно осуществлялись проволочными профилометрами, установленными после дублетов D113 и D115.



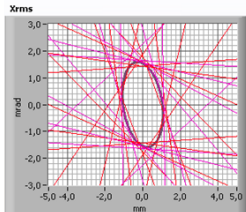
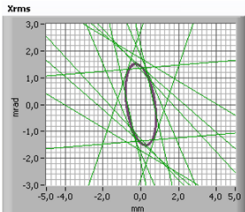
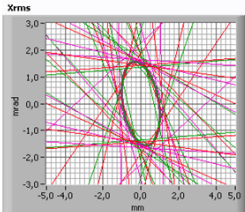
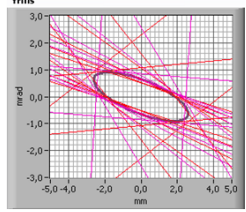
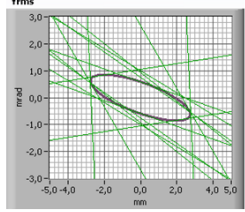
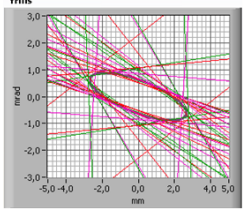
**Рис. 6.** (а) Магнитооптическая схема участка ЛУ ИЯИ для измерения эмиттанса.

(б) Бета-функции пучка. (в) Положение центра тяжести пучка.

На рис. 7 приведены результаты измерений среднеквадратичного ненормализованного эмиттанса при энергии 127.84 МэВ (частота 1 Гц, длительность импульса тока пучка 170 мкс, импульсный ток 10 мА), полученные в результате обработки профилей пучка по описанной выше процедуре. Показаны результаты измерений с помощью проволочных ДПП и ИМПС, а также суммарные картины при взаимном наложении результатов. Кроме того, приведены значения нормализованного эмиттанса.

Следует отметить, что измерения с помощью ИМПС меньше зависят от стабильности пучка, которая особенно важна для проволочных профилометров, так как в этом случае одно измерение длится около трех минут, в отличие от измерений с помощью ИМПС, занимающих не более 0.2 секунды.

Также в главе приведены результаты измерений положения центра пучка на фазовой плоскости, используемые для настройки и коррекции пучка с целью снижения потерь.

Среднеквадратичный ненормализованный эмиттанс, восстановленный в виде эквивалентного фазового эллипса		
ДПП D113 + ДПП D115	ИМПС	ДПП D113 + ДПП D115 + ИМПС
		
$\varepsilon_X = 1.6603 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ $\varepsilon_X^{norm} = 0.8958 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$	$\varepsilon_X = 1.1515 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ $\varepsilon_X^{norm} = 0.6212 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$	$\varepsilon_X = 1.5010 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ $\varepsilon_X^{norm} = 0.8098 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$
		
$\varepsilon_Y = 1.6949 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ $\varepsilon_Y^{norm} = 0.9144 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$	$\varepsilon_Y = 1.6234 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ $\varepsilon_Y^{norm} = 0.8758 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$	$\varepsilon_Y = 1.6880 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ $\varepsilon_Y^{norm} = 0.9107 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$

**Рис. 7.** Среднеквадратичный ненормализованный эмиттанс, восстановленный в виде эквивалентного фазового эллипса для пучка протонов ускорителя ИЯИ РАН с энергией 127.84 МэВ по данным проволочных сканеров и ИМПС.

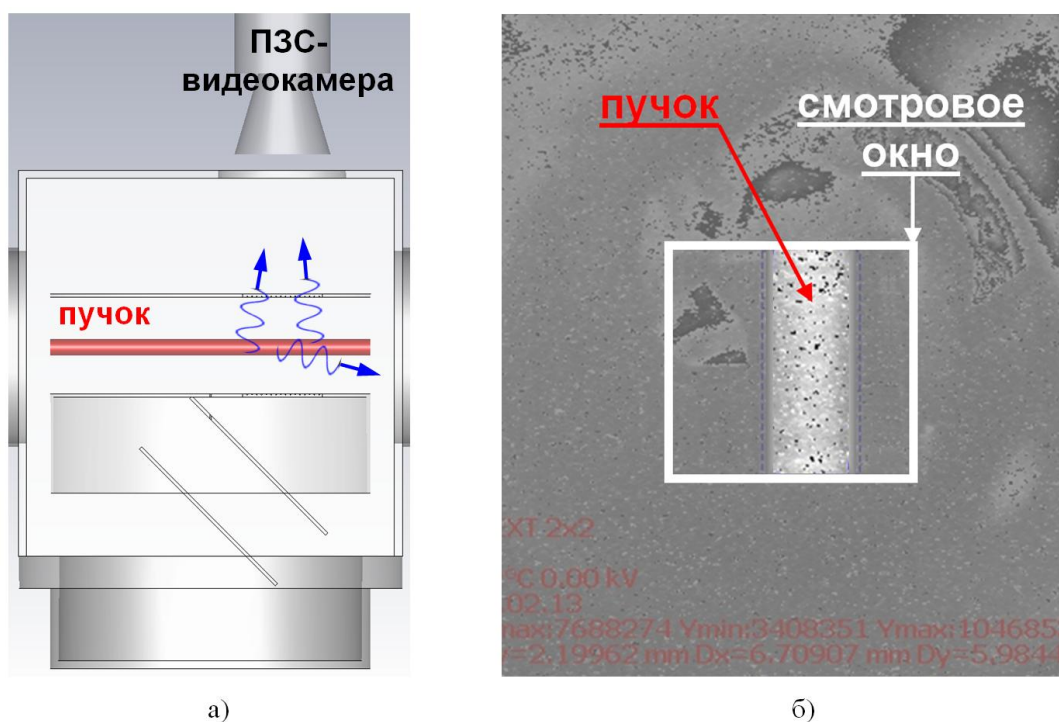
В итоговой части главы обсуждается воздействие извлекающего электрического поля ИМПС на траекторию исследуемого пучка и связанные с этим ограничения в работе Ионизационного монитора.

В случаях, когда искажения траектории анализируемого пучка из-за постоянной работы ИМПС по каким-либо причинам не могут быть скорректированы, Монитор можно использовать только для однократных измерений в процессе настройки пучка, а для последующего оперативного контроля переходить к диагностическим возможностям ИМПС на основе свечения остаточного газа.

В процессе взаимодействия анализируемого пучка с остаточным газом большая часть образующихся вторичных электронов находится в низкоэнергетической части спектра. Вторичные электроны возбуждают, в свою очередь, молекулы остаточного газа, причем сечение возбуждения увеличивается по мере снижения энергии электронов до значения потенциала возбуждения. Поэтому свечение возникает в основном за счет столкновения медленных вторичных электронов с молекулами газа. Спектральный состав свечения зависит от состава остаточного газа, однако, как правило, основной излучающей компонентой являются возбужденные молекулы и молекулярные ионы азота.

Так как в существующей конфигурации Монитор имеет одно смотровое окно (рис. 8а), то наблюдения могли производиться только в горизонтальной плоскости.

На рис. 8б представлены впервые полученные результаты использования систем Ионизационного монитора для поперечной диагностики пучка по свечению остаточного газа на канале инжекции ЛУ ИЯИ РАН.



**Рис. 8.** а) Схема измерений профиля пучка по свечению остаточного газа в ИМПС, б) Свечение остаточного газа (пучок:  $p^+$ , 400 кэВ, 45 мА, 200 мкс, 50 Гц), наблюдаемое через окно вакуумного бокса ИМПС на канале инжекции ЛУ ИЯИ.

В конце главы перечисляются реализованные преимущества Ионизационного монитора и обсуждаются перспективы его дальнейшего использования для расширения систем неразрушающей диагностики как существующих, так и строящихся ускорительных комплексов – на пучках с повышенными требованиями к уровню потерь.



В **Заключении** приводятся основные результаты работы:

1. Выполнен многопараметрический анализ особенностей метода неразрушающей двумерной поперечной диагностики пучков на основе ионизации остаточного газа в вакуумной камере ускорителя в широком диапазоне токов, энергий и типов частиц.
2. Проведены экспериментальные исследования особенностей эксплуатации Ионизационного монитора в условиях радиационного фона сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН, а также осуществлены анализ и практическое усовершенствование конструкции радиационной защиты телевизионной системы съема и обработки получаемых изображений.
3. Проведен анализ и определены методы минимизации погрешностей Ионизационного монитора поперечного сечения пучка, на основе чего предложена усовершенствованная конструкция Ионизационного монитора, принятая к разработке для форинжектора комплекса NICA ОИЯИ.
4. На основе проведенных исследований, реализованных усовершенствований и опыта эксплуатации детектора разработана компьютерная программа, позволяющая осуществлять оценку возможности использования Ионизационного монитора для диагностики пучков с круглым поперечным сечением и давать рекомендации к его применению на других ускорителях.
5. Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее значительно расширить возможности системы съема видеоданных и других систем, входящих в состав детектора, а также усовершенствовать цифровую обработку получаемых изображений.
6. Получены изображения двумерного поперечного сечения пучка протонов с энергией в сотни МэВ от низкоинтенсивного тока протонов.
7. Экспериментально показана возможность применения метода двумерной неразрушающей диагностики для измерений эмиттанса низкоинтенсивных протонных пучков.
8. На канале инжекции линейного ускорителя ИЯИ РАН экспериментально показана возможность использования систем Ионизационного монитора поперечного сечения для другого типа поперечной диагностики пучка – измерения профилей по свечению остаточного газа.
9. Обеспечен оперативный неразрушающий контроль поперечных параметров пучка на выходе линейного ускорителя ИЯИ РАН в широком динамическом диапазоне (5 мкА, 7 мкс ÷ 10 мА, 120 мкс).

### **Список публикаций по теме диссертации.**

1. Reinhardt-Nickoulin P., Feschenko A., Gavrilov S. Ion monitor of transverse beam parameters for INR proton linac. // Proceedings of XXI Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2008), 2008, Zvenigorod, Russia. [www.jacow.org](http://www.jacow.org)
2. Гаврилов С., Рейнгардт-Никулин П., Фещенко А. Ионизационный монитор поперечного сечения ускоренного пучка частиц. // Труды 9-й Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики (БМШ ЭТФ), 2008, Приэльбрусье, Россия.
3. Гаврилов С., Рейнгардт-Никулин П., Фещенко А. Развитие ионизационного монитора поперечного сечения пучка ускоренных частиц. // Труды 52-й научной конференции МФТИ, ч. VIII «Проблемы современной физики», 2009, Долгопрудный, Россия.
4. Гаврилов С., Рейнгардт-Никулин П., Фещенко А. Влияние объемного заряда пучка протонов на работу Ионизационного монитора пучка сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН. // Труды 53-й научной конференции МФТИ, ч. VIII «Проблемы современной физики», 2010, Долгопрудный, Россия.
5. Рейнгардт-Никулин П., Васильев И., Гаврилов С., Фещенко А. Развитие ионизационного монитора поперечного сечения протонного пучка линейного ускорителя ИЯИ РАН. Вопросы атомной науки и техники (Problems of atomic science and technology), 2010, т. 2(66), с. 39 – 43 .
6. Гаврилов С., Рейнгардт-Никулин П., Фещенко А. Ионизационный метод прозрачной диагностики пучков ускоренных частиц. // Физическое образование в вузах (Труды конференции молодых физиков), 2010, т. 16, № 1, с. 38 – 39.
7. Reinhardt-Nickoulin P., ..., Gavrilov S. et al. Beam Cross Section Monitor for INR Linac. // Proceedings of XXV Linear Accelerator Conference (LINAC10). 2010, Tsukuba, Japan. [www.jacow.org](http://www.jacow.org)
8. Reinhardt-Nickoulin P., ..., Gavrilov S. et al. Distortions of proton beam 2-D images and profiles due to beam space charge. // Proceedings of XXII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2010), 2010, Protvino, Russia. [www.jacow.org](http://www.jacow.org)
9. Reinhardt-Nickoulin P., ..., Gavrilov S. et al. Beam parameters measurements by ionization cross section monitor on proton linac of INR RAS // Proceedings of 10<sup>th</sup> European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators DIPAC2011, Hamburg, Germany. [www.jacow.org](http://www.jacow.org)
10. Гаврилов С. и др. Перспективы использования ионизационного монитора поперечного сечения пучка на ускорителях FRIB Michigan State University и У-70 ИФВЭ. Вопросы

атомной науки и техники (Problems of atomic science and technology), 2012, т. 3(80), с. 19 – 23.

11. Гаврилов С. и др. Защита электроники ионизационного монитора поперечного сечения пучка от радиационных повреждений на линейном ускорителе ИЯИ РАН. Вопросы атомной науки и техники (Problems of atomic science and technology), 2012, т. 3(80), с. 218 – 222.
12. Reinhardt-Nickoulin P., ..., Gavrilov S. et al. Emittance measurements at the exit of INR linac. // Proceedings of XXIII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2012), 2012, Saint-Petersburg, Russia. [www.jacow.org](http://www.jacow.org)
13. Gavrilov S. et al. Analysis of measurement errors of INR linac ionization beam cross section monitor. // Proceedings of International Beam Instrumentation Conference 2013 (IBIC-2013), 2013, Oxford, UK. [www.jacow.org](http://www.jacow.org)