

ТОМОГРАФИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ПУЧКА  
СИЛЬНОТОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ВОДОРОДА© 2023 г. А. И. Титов<sup>a,b,\*</sup>, С. Е. Брагин<sup>a</sup>, О. М. Володкевич<sup>a</sup>, С. А. Гаврилов<sup>a,b</sup><sup>a</sup>Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

<sup>b</sup>Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)  
Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский переулок, 9

\*e-mail: aleksandr.titov@phystech.edu

Поступила в редакцию 23.05.2022 г.

После доработки 27.06.2022 г.

Принята к публикации 07.07.2022 г.

Представлен вариант томографической реконструкции поперечного фазового портрета пучка на основе быстрого метода одновременной алгебраической реконструкции, редко используемого в ускорительной физике. Разработанная процедура диагностики реализована на сильноточном линейном ускорителе ионов водорода ИИЯ РАН и экспериментально проверена в диапазоне энергий пучка от нескольких десятков до нескольких сотен мегаэлектронвольт. Показана возможность использования данных различных измерителей профиля пучка и проведено сравнение томографического метода со стандартным методом поперечных профилей. Предложена процедура верификации реконструированных данных для использования в матричных кодах трассировки пучков и представлены примеры ее использования в случае фазовых портретов принципиально неэллиптической формы.

DOI: 10.31857/S0032816222060209, EDN: JRCBPQ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения параметров поперечного фазового портрета пучка необходимы для моделирования динамики пучка и последующей оптимизации магнитооптики ускорителя. Для пучков ионов водорода низких энергий (менее 10 МэВ) можно проводить прямые измерения эмиттанса пучка при помощи различных контактных измерителей эмиттанса на основе тонких щелей или диафрагм. Однако в случае более высоких энергий прямые измерения, как правило, становятся некорректными из-за принципиальной неприменимости приближения “тонкой” щели. Кроме того, в случае высокоинтенсивных пучков в сильноточных ускорителях тепловые нагрузки на такие контактные измерители еще больше ограничивают допустимый диапазон энергий. В этой ситуации на первый план выходят методы математической реконструкции, наиболее распространенными из которых являются методы квадрупольной вариации (МКВ). Типичное расположение оборудования, необходимого для измерений с помощью МКВ, представлено на рис. 1. Для измерений используются установленные профилометры, элементы магнитооптики ускорителя и компоненты систем управления, сбора и обработки данных. Установка дополнительных устройств не требуется.

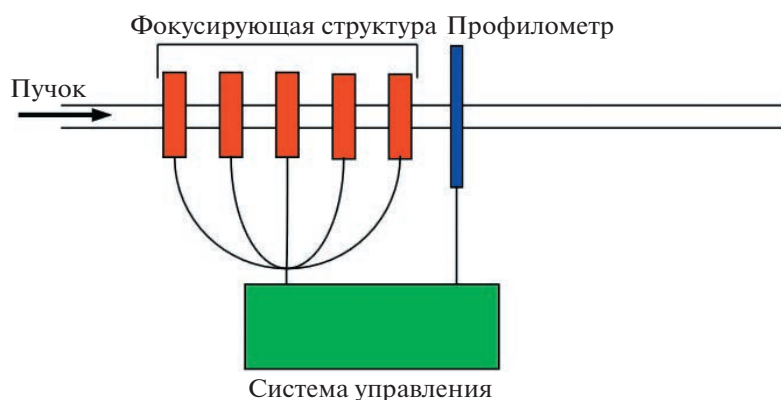
МКВ — это группа методов, которая обычно применяется, как описано в работе [1]. Измерения при помощи МКВ позволяют получить информацию об эквивалентном фазовом эллипсе (далее — “фазовый эллипс”). Фазовый эллипс является удобной моделью описания распределения частиц пучка в фазовой плоскости. При линеаризации уравнений движения частиц в ускорителе все частицы оказываются внутри кривой второго порядка, описываемой следующим уравнением:

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \varepsilon \quad (1)$$

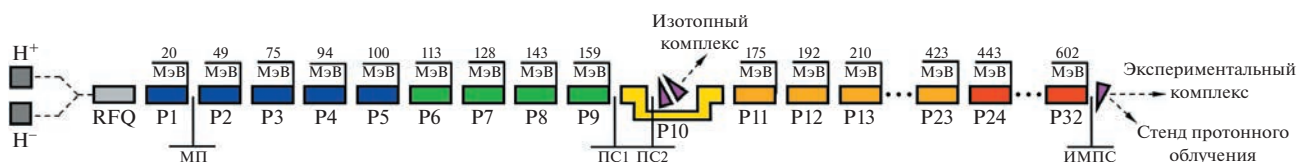
где  $x, x'$  — координаты в фазовой плоскости;  $\alpha, \beta, \gamma$  — параметры Твисса;  $\varepsilon$  — эмиттанс пучка [2].

Одним из методов измерения параметров поперечного фазового портрета пучка, который можно отнести к МКВ, является хорошо известная в медицине и промышленности томографическая реконструкция. Это процесс реконструкции двумерного, иногда трехмерного, объекта на основе одномерных проекций этого объекта, полученных под разными углами.

Томографическая реконструкция может дать информацию не только об огибающей фазового портрета пучка и полученном из нее эквивалент-



**Рис. 1.** Типичное расположение оборудования, необходимого для проведения измерений при помощи метода квадрупольной вариации.



**Рис. 2.** Схема линейного ускорителя ИЯИ РАН. МП – многопроволочный профилометр; ИМПС – ионизационный монитор поперечного сечения; ПС – проволочный сканер; RFQ – резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой; P – резонатор.

ном фазовом эллипсе, но и о плотности распределения частиц пучка в фазовом пространстве, что делает данную разновидность МКВ столь же информативной, как и методы прямых измерений поперечного эмиттанта. Однако, как правило, разработка алгоритмов томографической обработки является более сложной задачей по сравнению с типичными алгоритмами МКВ.

Применимость томографии к измерениям параметров пучка основана на свойствах преобразования Радона. Впервые данный метод был реализован на ускорителях в 70-х годах XX века [3]. Впоследствии он был успешно использован для измерений поперечных фазовых портретов пучков электронов [4, 5] и протонов [6]. На линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН такая процедура была внедрена на выходе ускорителя на основе ионизационного монитора поперечного сечения (ИМПС) [7] для проведения оперативных автоматизированных измерений эмиттанта пучка, транспортируемого далее на установки экспериментального комплекса по каналам сложной конфигурации длиной до 200 м. Также была разработана программа для постобработки измеренных профилей пучка (офлайн-томография) с использованием данных как с ИМПС, так и с любых других профилометров, установленных на ускорителе.

Линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН (Москва, Троицк), схема которого представлена на рис. 2, представляет собой сильноточный резонансный ускоритель, рассчитанный на средние и промежуточные энергии до 602 МэВ, ток пучка до 15 мА, длительность импульса тока до 150 мкс с частотой повторения импульсов до 50 Гц.

В данной статье исследуется применимость томографического метода только для измерения распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях и не рассматриваются вопросы измерения продольного эмиттанта [8–10] или многомерного распределения частиц в фазовом пространстве [11–13].

## 2. СОГЛАШЕНИЕ О ФАЗОВОМ ЭЛЛИПСЕ

Моделирование динамики пучка в данном ускорителе выполняется с помощью матричного кода TRACE-3D [14], требующего параметры Твисса ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) фазового эллипса в качестве начальных данных, при этом основным используемым методом измерений является типичная реализация МКВ – метод поперечных профилей (МПП) [15]. Томографическая реконструкция, реализованная как альтернатива МПП, также должна восстанавливать значения параметров Твисса. С учетом того, что для восстановления фазового эллипса МПП использует среднеквад-

ратичный размер пучка, а томографическая реконструкция — полный размер пучка, сравнение результатов этих методов следует проводить с учетом принятого на линейном ускорителе ИЯИ РАН соглашения о том, что “полный” размер пучка равен пяти среднеквадратичным размерам, таким образом, эмиттанс “полного” пучка  $\varepsilon = \varepsilon_{2.5\text{rms}} = 6.25\varepsilon_{\text{rms}}$ .

### 3. ПРОФИЛОМЕТРЫ

В данном разделе будут описаны все профилометры вместе с элементами магнитооптики, используемыми для преобразования фазового объема пучка в каждом конкретном случае. Для измерения профилей и положения пучка используются профилометры нескольких типов: многопроволочные профилометры (МП), проволочные сканеры (ПС) и ИМПС. Для профилометра каждого типа осуществляется обрезка измеренных профилей на величину отсечки, которая будет представлена в разделе о результатах томографической реконструкции.

#### 3.1. Проволочные профилометры

Для томографии фазового портрета был использован многопроволочный профилометр, расположенный на выходе первого резонатора P1 с трубками дрейфа. Профилометр состоит из 15-ти проволочек в каждой плоскости. Толщина проволочек равна 100 мкм, они размещены с шагом 2 мм по осям  $X$  и  $Y$ , ввод профилометра в ионопровод осуществляется шаговым двигателем. Для преобразования фазового объема пучка используются девятнадцать квадрупольных линз в трубках дрейфа, питаемых тремя независимыми источниками тока. Первый и второй источники питают по девять линз каждый, третий источник питает последнюю линзу в резонаторе.

Также для проведения измерений использовались два проволочных сканера, расположенные в области согласующего резонатора P10. Для преобразования фазового объема пучка используются восемь квадрупольных дублетов с питанием от четырех независимых источников тока, каждый источник тока питает два дублета. Сбор данных с этих профилометров осуществляется с помощью плат National Instruments PCI 6259 [16].

#### 3.2. Ионизационный монитор поперечного сечения

Принцип работы ИМПС, расположенного на выходе ускорителя (P32 на рис. 2), основан на ионизации остаточного газа в ионопроводе. Изображение с его люминесцентного экрана передается через зеркально-линзовую систему и регистрируется камерой Basler acA780–75gm [17], которая установлена за бетонной защитой уско-

рителя и подключена к компьютеру в пультовой по локальной сети. Для преобразования фазового объема пучка используются восемь квадрупольных дублетов, питаемых двумя независимыми источниками тока, каждый источник тока питает четыре дублета.

### 4. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

Разработанное программное обеспечение для томографии поперечного фазового портрета пучка имеет две версии. Первая версия представляет собой онлайн-программу для оперативной процедуры томографии на основе данных ИМПС. Другая версия — это офлайн-томография, используемая для постобработки данных с любых профилометров. Обе версии созданы на LabVIEW [18], как и большая часть программного обеспечения системы управления линейным ускорителем ИЯИ РАН, вычислительное ядро томографии написано на Python.

#### 4.1. Вычислительное ядро томографии

Вычислительное ядро основано на методе одновременной алгебраической реконструкции (SART — Simultaneous algebraic reconstruction technique) [19], который считается быстро сходящимся алгоритмом [20]. Помимо SART, рассматривались также метод фильтрованных обратных проекций (FBP — Filtered back projection), метод алгебраической реконструкции (ART — Algebraic reconstruction technique) и метод максимальной энтропии (MENT — Maximum entropy). Для достижения одинакового уровня среднеквадратичной ошибки алгоритму SART требуется меньшее количество проекций, чем методам FBP и ART [19]. Метод MENT сравним по точности с методом SART, но его реализация представляет собой более сложную задачу [5]. Вариант алгоритма SART взят из пакета с открытым исходным кодом “scikit image” [21].

Представленные далее характеристики алгоритма SART основаны на реконструкции фантома Шеппа–Логана (рис. 3), который в основном используется в медицине и представляет собой модель человеческой головы. Большинство алгоритмов томографической реконструкции тестируется на этом фантоме. Мы считаем, что эта модель подходит для испытаний SART в нашем случае, поскольку она похожа на эллиптическое распределение пучка со сложной внутренней структурой.

На рис. 4 показано изменение среднеквадратичной ошибки в зависимости от числа итераций для различного количества проекций, равномерно распределенных по углам. Для получения среднеквадратичной ошибки фантом Шеппа–Логана преобразовывался в синограмму в соответствии с требуемым количеством проекций.



Рис. 3. Фантом Шеппа–Логана.

Полученная синограмма передавалась вычислительному ядру, которое восстанавливало двумерное изображение. Интенсивность восстановленного и исходного изображений сравнивалась по пиксельно, и вычислялась среднеквадратичная ошибка восстановления фантома.

Обычно для восстановления эмиттанса пучка на линейном ускорителе ИЯИ РАН используются менее десяти проекций фазового объема. Как показано на рис. 4, в этом случае SART сходится на

пятой итерации, поэтому вычислительное ядро выполняет пять итераций.

#### 4.2. Онлайн-томография

Программа для онлайн-томографии состоит из модулей управления и сбора данных с ИМПС, основанных на программном обеспечении, которое подробно описано в работе [22], и модуля томографии. На этапе измерений программа изменяет токи в источниках питания линз в соответствии с планом, затем измеряет профили. Выполнив все запланированные измерения, программа возвращает исходные токи в источниках и запускает томографическую реконструкцию на основе измеренных профилей.

Этап восстановления начинается с создания матриц преобразования фазового объема пучка для каждого измеренного профиля. В общем случае эта матрица является матрицей аффинного преобразования, которое может быть представлено как комбинация поворота, сдвига и сжатия. В процедуре томографии измеряемый объект должен подвергаться только преобразованию поворота, поэтому преобразования сдвига и сжатия необходимо обратить с использованием дискретного аффинного преобразования. Скорректированные профили преобразуются в синограмму. Углы поворота в фазовом пространстве получаются из соответствующих матриц. После всех

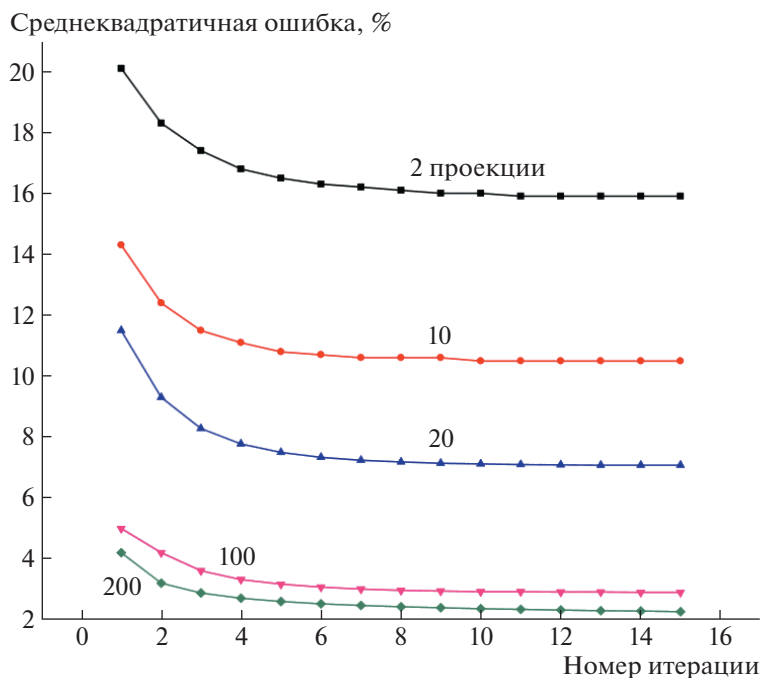
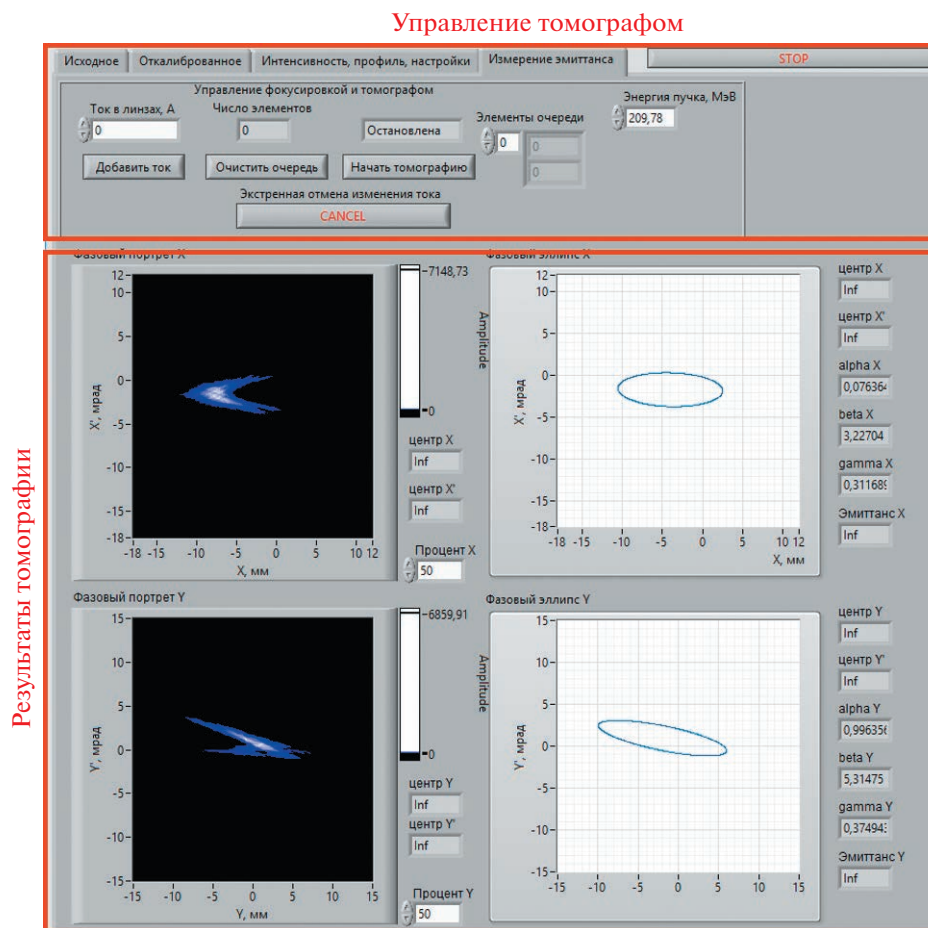


Рис. 4. Среднеквадратичная ошибка SART в зависимости от количества итераций для различного числа проекций (цифры у кривых).



**Рис. 5.** Вкладка программы с настройками и данными онлайн-томографии. В окне “Управление томографом” вводятся данные для создания плана измерений и находятся кнопки запуска и экстренной остановки томографа. В окне “Результаты томографии” отображаются выбранные подпортреты, фазовые эллипсы и параметры Твисса для обеих фазовых плоскостей.

преобразований синограмма и углы поворота передаются в вычислительное ядро.

Результаты реконструкции, полученные с помощью вычислительного ядра, подвергаются постобработке. Каждый фазовый портрет разбивается на 20 подпортретов. Подпортреты формируются следующим образом: точки исходного портрета сортируются в порядке убывания соответствующих значений плотности распределения частиц в фазовом пространстве, затем отсортированные точки по очереди включаются в подпортрет, пока суммарная плотность распределения частиц подпортрета не будет равна 5% от суммарной плотности распределения исходного портрета. На этом формирование первого подпортрета завершается. Второй подпортрет формируется таким же образом, но его суммарная плотность распределения частиц равна 10% от суммарной плотности распределения исходного портрета, у третьего — 15% и т.д. Для каждого подпортрета вычисляется огибающая и фазовый эллипс, кото-

рый аппроксимирует эту огибающую, рассчитываются параметры Твисса, эмиттанс и центр каждого фазового эллипса. Все эти данные отображаются для пользователя. Одна из вкладок программы с настройками томографии и результатами измерений представлена на рис. 5.

#### 4.3. Офлайн-томография

Программа для офлайн-томографии использует то же ядро, что и онлайн-версия, однако в качестве входных данных офлайн-программе требуется массив профилей, которые были ранее измерены, и массив матриц преобразования фазового объема пучка для каждого измеренного профиля. Постобработка аналогична онлайн-томографии. Отличительной особенностью программы офлайн-томографии является функция устранения артефактов реконструкции, возникающих во время томографии: наличие матрицы преобразования для каждого профиля дает возможность смодели-

**Таблица 1.** Значения погрешностей для различных профилометров

| Профилометр                               | $\sigma_c$ , мм | $\sigma_s$ , мм |
|-------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Многопроволочный профилометр              | 0.25            | 0.58            |
| Проволочный сканер                        | 0.1             | 0.06            |
| Ионизационный монитор поперечного сечения | 0.2             | 0.3             |

ровать динамику восстановленного фазового портрета и сравнить измеренные и восстановленные профили пучка с использованием определенной весовой функции, вычисляемой в два этапа. На первом шаге вычисляется средняя относительная разность между восстановленными и измеренными профилями. Если интенсивности обоих профилей в каких-то координатах равны нулю, то эта точка не учитывается. На втором шаге значения, рассчитанные для каждого профиля, усредняются. Эта функция применяется ко всем двадцати подпортретам, которые получаются после постобработки. Подпортрет с наименьшим значением весовой функции рассматривается как итоговый результат томографии. На рис. 6 представлен график весовой функции с изображениями фазовых портретов, соответствующих разным точкам. Рабочее окно программы офлайн-томографии представлено на рис. 7.

#### 4.4. Погрешности измерений

Погрешности измерений при помощи томографии можно разделить на две группы: погрешности профилометра и погрешности томографического метода. К погрешностям профилометра относятся погрешность измерения положения  $\sigma_c$  и погрешность измерения полного размера  $\sigma_s$ . Эти погрешности различаются для разных профилометров и представлены в табл. 1.

Погрешность томографии  $\sigma_t$  также состоит из нескольких частей.

Первая часть относится к ошибкам матричного метода. Его применимость основывается на приближении малых углов, поэтому значение относительной погрешности матричного метода  $\sigma_m$  принимается равным точности выполнения условия малости углов. В резонаторах начальной части ускорителя ИЯИ РАН расстояние между трубками дрейфа составляет в среднем 200 мм, а апертура трубок — до 15 мм. Следовательно, максимальный угол наклона, который может иметь пучок, составляет 0.1 рад. В таком случае приближение малых углов ( $\text{tg}\alpha \approx \alpha$ ) выполняется с точностью 0.3%. В основной части ускорителя расстояние между квадрупольными дублетами составляет 3000 мм, апертура — 40 мм, максимальный угол равен 0.01

рад, а приближение малых углов выполнено с точностью лучше чем 0.1%. Таким образом  $\sigma_m \leq 0.003$ .

Второй частью является процедура реконструкции, которая включает в себя погрешность алгоритма SART и погрешность преобразования измеренных для томографии профилей. На основе информации о количестве проекций и числе итераций из рис. 4 мы получаем, что относительная погрешность  $\sigma_{\text{SART}}$  примерно равна 11%. Погрешность преобразования профиля возникает из-за использования дискретного аффинного преобразования и может быть оценена следующим образом: заданный аналитически профиль преобразуется дискретным аффинным преобразованием и результат сравнивается с аналитически преобразованным профилем (рис. 8). Погрешность преобразования профиля  $\sigma_r$ , основанная на этой оценке, составляет около 12%.

Третьей составляющей является погрешность измерения параметров фазового эллипса, для которой необходимо учесть относительную погрешность аппроксимации огибающей восстановленного фазового портрета эллипсом  $\sigma_a$ . Она определяется встроенным алгоритмом аппроксимации в LabVIEW. Для оценки была измерена точность аппроксимации для квазиэллиптических пучков, как показано на рис. 9. В этом случае  $\sigma_a = 0.09$ . Однако эта погрешность может увеличиваться в зависимости от степени отличия огибающей фазового портрета от эллипса.

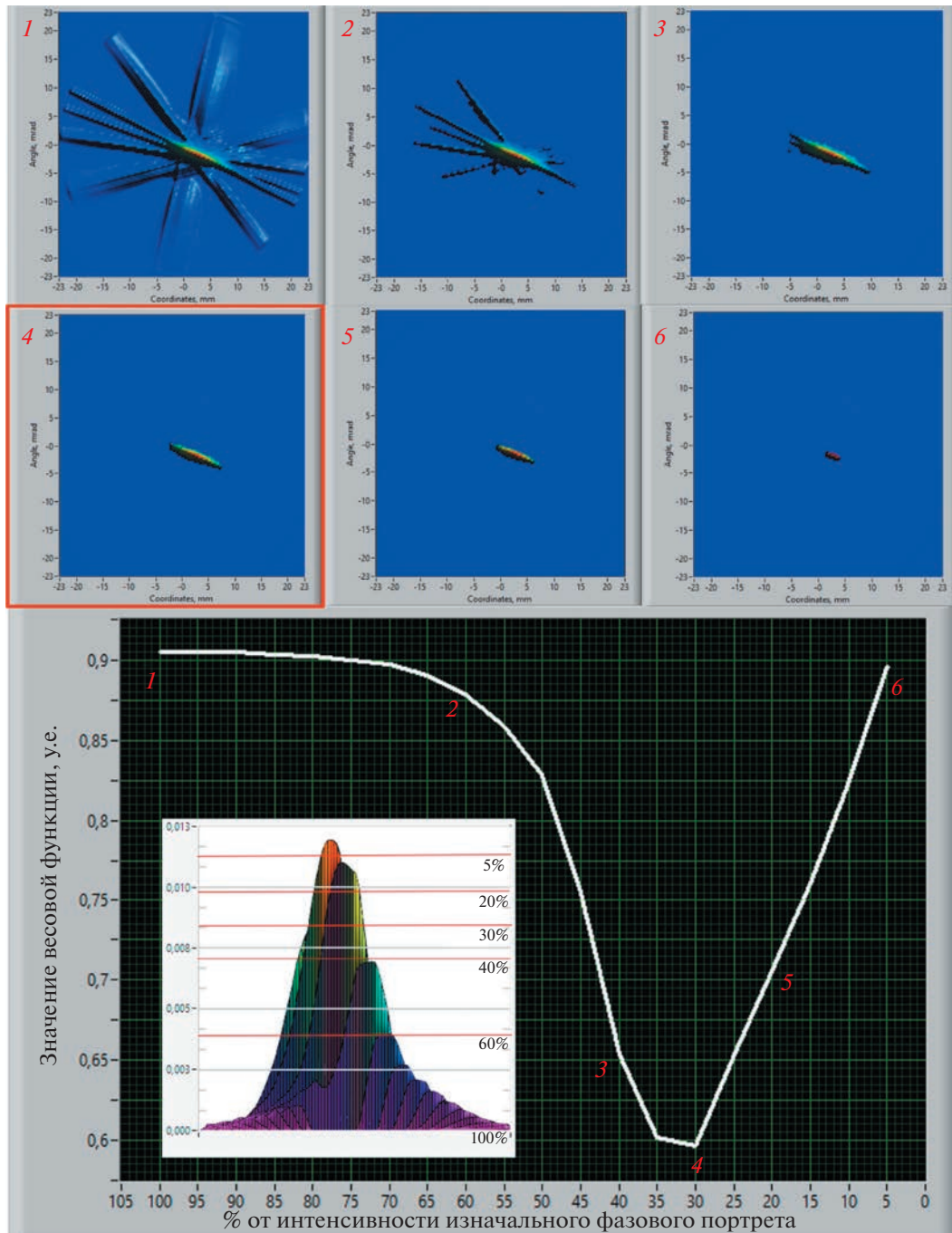
Таким образом, общая относительная погрешность процедуры томографии  $\sigma_t$  равна:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{\text{SART}}^2 + \sigma_r^2 + \sigma_a^2} = 0.18. \quad (2)$$

Однако значение  $\sigma_a$  было оценено только для квазиэллиптической огибающей. Для других огибающих погрешность аппроксимации может составлять более 9%, и для таких случаев мы предполагаем, что допустимое максимальное значение  $\sigma_t$  составляет 20%, так как при разработке процедуры томографии фазового портрета было наложено начальное условие на дальнейшее применение этой методики: восстановление значения полного размера пучка должно выполняться с погрешностью меньшей, чем его среднеквадратичный размер, т.е., исходя из соглашения о том, что полный размер пучка равен пяти среднеквадратичным размерам, можно считать, что относительная погрешность процедуры восстановления не должна превышать 20%.

С учетом всех оценок погрешности ( $\sigma_{ex}, \sigma_{ex'}$ ) для координат центра эллипса  $x_c$  и  $x'_c$  соответственно равны:





**Рис. 6.** Вверху — изображения подпортретов. Обведенный рамкой портрет — итоговый результат томографической реконструкции. Внизу — график зависимости значений весовой функции от суммарной интенсивности подпортрета, цифрами обозначены соответствующие подпортреты. На вставке к графику — вид сбоку на первичный результат работы вычислительного ядра.

$$\sigma_{ex} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2 + \sigma_t^2 x^2}, \quad (3)$$

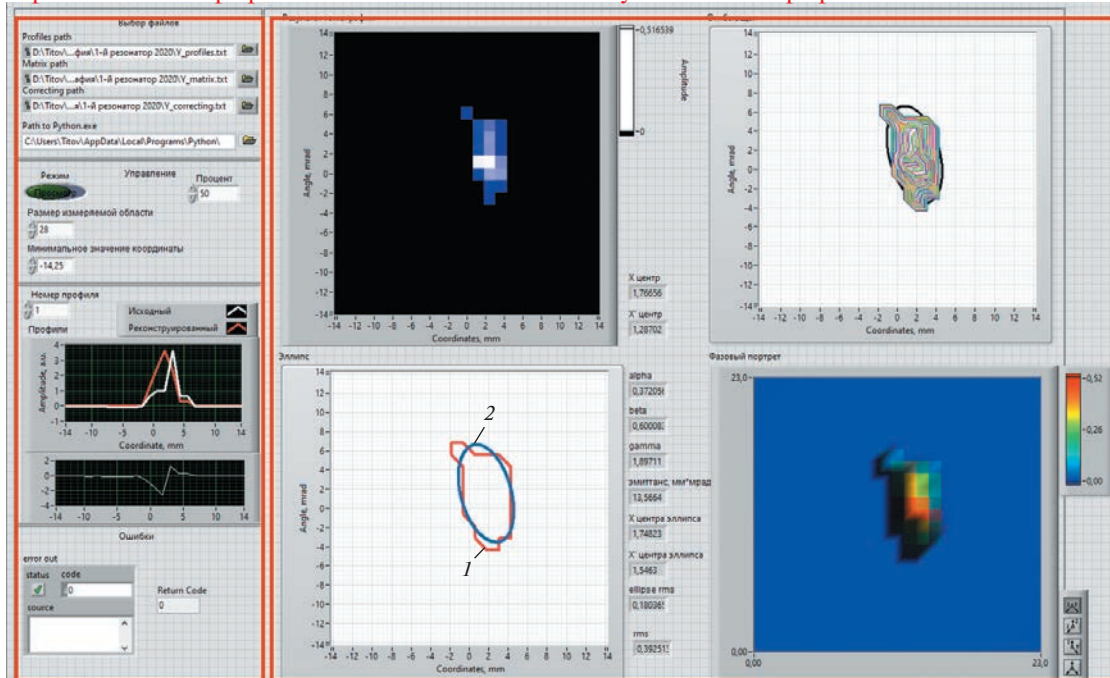
$$\sigma_{ex'} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2 + \sigma_t^2 x'^2}. \quad (4)$$

Для вычисления  $\sigma_{ex'}$ , значения  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  берутся в миллирадианах, потому что выбор размерностей

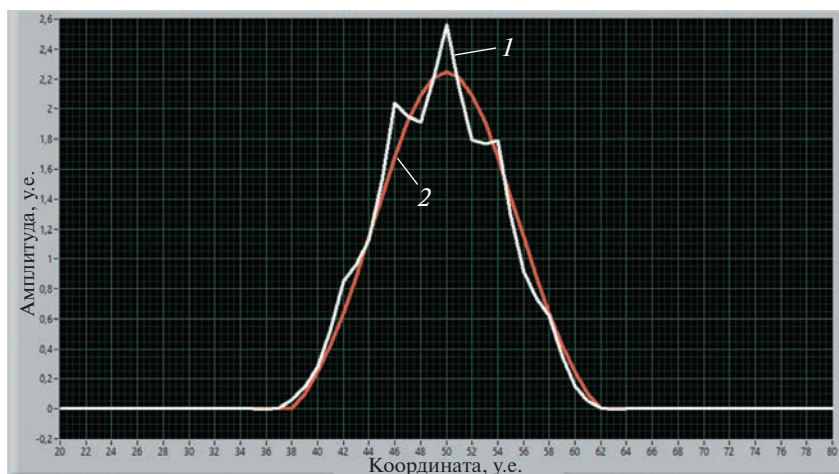
осей координат определяется матрицами поворота, которые использует SART-алгоритм, преобразующий одномерные проекции фазового портрета в двумерное изображение без какой-либо привязки к размерностям осей координат. В нашем случае матрицы поворота формируются из мат-

## Управление томографом

## Результаты томографии



**Рис. 7.** Вкладка программы офлайн-томографии. В окне “Управление томографом” вводятся данные настройки томографа, здесь же график, где отображаются измеренный (белый) и восстановленный (красный) профили. В окне “Результаты томографии” на графиках слева: сверху — фазовый портрет, внизу — его огибающая (красная линия 1) и фазовый эллипс (синяя линия 2); в числовом формате представлены координаты фазового эллипса и параметры Твисса; на графиках справа: сверху — промежуточные расчеты огибающей портрета, внизу — интерактивная 3D-диаграмма распределения плотности пучка на фазовой плоскости.



**Рис. 8.** Результат дискретного аффинного преобразования профиля (1) и аналитически преобразованный профиль пучка (2).

риц преобразования фазового объема, а следовательно, размерности осей координат — это миллиметры и миллирадианы.

Для расчета погрешностей эмиттанса и параметров Твисса требуется относительная погрешность измерения размера пучка. Радиус пучка

оценивается как  $\sqrt{\epsilon\beta}$ . Погрешности параметров Твисса ( $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\beta$ ,  $\sigma_\gamma$ ) и эмиттанса ( $\sigma_\epsilon$ ) с учетом всех составляющих равны

$$\begin{aligned} \sigma_\epsilon &= \epsilon k, & \sigma_\alpha &= \alpha k, \\ \sigma_\beta &= \beta k, & \sigma_\gamma &= \gamma k, \end{aligned} \quad (5)$$



где  $k$  определяется формулой

$$k = \sqrt{\frac{\sigma_s^2}{\epsilon\beta} + \sigma_t^2}. \quad (6)$$

Численные значения погрешностей получены после замены  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  их значениями из табл. 1 и представлены в табл. 2–4.

Для проверки точности результатов томографии рассчитывается динамика пучка на основе восстановленных фазовых эллипсов, после чего полученные расчетные значения положения центра тяжести и радиуса пучка сравниваются с измеренными. В качестве единицы сравнения используется среднеквадратичная погрешность восстановленного значения. Если радиусы пучка, восстановленные на основе моделирования динамики, отличаются от измеренных значений более чем на одно стандартное отклонение, то фазовый портрет не рассматривается как эллиптический и не может быть использован для моделирования динамики пучка в TRACE-3D. Разность между измеренным и восстановленным профилями обозначается как  $v_e$ . В этих терминах этот критерий может быть сформулирован как  $v_e \leq 1$ .

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТОМОГРАФИИ

В настоящее время процедура томографии на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН проходит различные тесты, которые можно разделить на две части. Первая часть — это тесты процедур управления и сбора данных, которые выполняются с помощью программы онлайн-томографии. Вторая часть — это тесты алгоритмов обработки данных, которые проводятся с использованием офлайн-томографии. В следующих подразделах представлены результаты, полученные во время двух последовательных сеансов работы ускорителя (сеанс 1 и сеанс 2), целью которых была оптимизация прохождения пучка вдоль всей машины. В промежутках между этими сеансами были изменены параметры магнитооптики ускорителя. Результаты представлены в порядке расположения профилометров вдоль ускорителя. На всех рисунках  $XX'$  — горизонтальная фазовая плоскость,  $YY'$  — вертикальная фазовая плоскость. Для каждого измерения был вычислен параметр  $v_e$ , который рассматривается как индикатор достоверности измерений. Обсуждение результатов представлено в следующем разделе.

### 5.1. Результаты МП

Данные многопроволочного профилометра были собраны в обоих сеансах. Энергия пучка составляла 20.45 МэВ для обоих сеансов, длительность импульса — 100 мкс. Порог отсечки профилей равен 1%. На рис. 10 показаны результаты то-

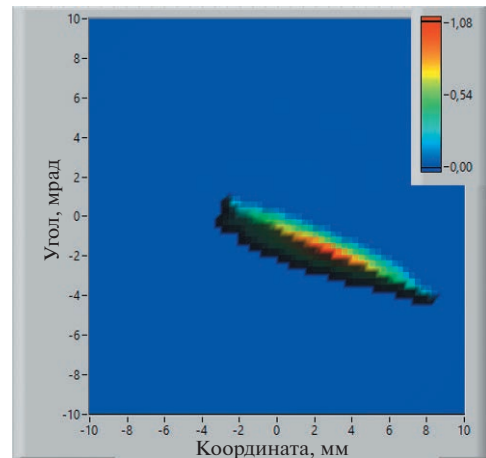


Рис. 9. Пример квазиэллиптического поперечного фазового портрета пучка.

мографии поперечного фазового портрета для обеих плоскостей на основе данных, полученных с помощью МП во время сеанса 1. На рис. 11 показаны такие же результаты, полученные с помощью МП во время сеанса 2. Значения параметров фазовых эллипсов для сеанса 2 представлены в табл. 2. В главе 6 будет показано, что результаты сеанса 1 являются некорректными, поэтому они не приведены в данной статье.

### 5.2. Результаты ПС

Данные проволочных сканеров были собраны во время сеанса 2. Энергия пучка составляла 158.56 МэВ для обоих сканеров, длительность импульса — 100 мкс. Порог отсечки профилей равен

Таблица 2. Результаты томографической реконструкции на основе данных с МП

| Сеанс 2                              |                  |                                      |                  |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
| Плоскость $XX'$                      |                  | Плоскость $YY'$                      |                  |
| Параметр                             | Значение         | Параметр                             | Значение         |
| $x_e$ , мм                           | $1.18 \pm 0.67$  | $y_e$ , мм                           | $0.84 \pm 0.65$  |
| $x'_e$ , мрад                        | $0.45 \pm 0.64$  | $y'_e$ , мрад                        | $0.95 \pm 0.66$  |
| $\alpha$                             | $-0.05 \pm 0.01$ | $\alpha$                             | $0.93 \pm 0.23$  |
| $\beta$ , мм/мрад                    | $0.58 \pm 0.17$  | $\beta$ , мм/мрад                    | $0.83 \pm 0.21$  |
| $\gamma$ , мрад/мм                   | $1.73 \pm 0.49$  | $\gamma$ , мрад/мм                   | $2.24 \pm 0.55$  |
| $\epsilon$ , мм · мрад               | $14.02 \pm 4.00$ | $\epsilon$ , мм · мрад               | $19.21 \pm 4.75$ |
| $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $2.48 \pm 0.71$  | $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $3.40 \pm 0.84$  |
| $v_e$                                | 0.38             | $v_e$                                | 0.51             |

**Таблица 3.** Результаты томографической реконструкции на основе данных с ПС

| ПС1                                  |                  |                                      |                  | ПС2                                  |                  |                                      |                 |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Плоскость $XX'$                      |                  | Плоскость $YY'$                      |                  | Плоскость $XX'$                      |                  | Плоскость $YY'$                      |                 |
| Параметр                             | Значение         | Параметр                             | Значение         | Параметр                             | Значение         | Параметр                             | Значение        |
| $x_e$ , мм                           | $-1.75 \pm 0.37$ | $y_e$ , мм                           | $2.23 \pm 0.46$  | $x_e$ , мм                           | $-0.30 \pm 0.13$ | $y_e$ , мм                           | $0.16 \pm 0.12$ |
| $x'_e$ , мрад                        | $1.19 \pm 0.27$  | $y'_e$ , мрад                        | $-1.64 \pm 0.35$ | $x'_e$ , мрад                        | $0.03 \pm 0.12$  | $y'_e$ , мрад                        | $0.00 \pm 0.12$ |
| $\alpha$                             | $0.02 \pm 0.01$  | $\alpha$                             | $1.72 \pm 0.34$  | $\alpha$                             | $-0.03 \pm 0.01$ | $\alpha$                             | $2.22 \pm 0.44$ |
| $\beta$ , мм/мрад                    | $1.47 \pm 0.30$  | $\beta$ , мм/мрад                    | $4.61 \pm 0.92$  | $\beta$ , мм/мрад                    | $1.53 \pm 0.31$  | $\beta$ , мм/мрад                    | $5.40 \pm 1.08$ |
| $\gamma$ , мрад/мм                   | $0.38 \pm 0.08$  | $\gamma$ , мрад/мм                   | $0.86 \pm 0.17$  | $\gamma$ , мрад/мм                   | $0.65 \pm 0.13$  | $\gamma$ , мрад/мм                   | $1.09 \pm 0.22$ |
| $\epsilon$ , мм · мрад               | $4.50 \pm 0.91$  | $\epsilon$ , мм · мрад               | $5.20 \pm 1.04$  | $\epsilon$ , мм · мрад               | $4.81 \pm 0.97$  | $\epsilon$ , мм · мрад               | $6.72 \pm 1.35$ |
| $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $2.43 \pm 0.49$  | $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $2.81 \pm 0.56$  | $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $2.60 \pm 0.52$  | $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $3.63 \pm 0.73$ |
| $v_e$                                | 0.86             | $v_e$                                | 0.11             | $v_e$                                | 0.28             | $v_e$                                | 0.47            |

**Таблица 4.** Результаты томографии на основе данных с ИМПС

| Импульс длительностью 32 мкс         |                  |                                      |                  | Импульс длительностью 100 мкс        |                  |                                      |                  |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
| Плоскость $XX'$                      |                  | Плоскость $YY'$                      |                  | Плоскость $XX'$                      |                  | Плоскость $YY'$                      |                  |
| Параметр                             | Значение         | Параметр                             | Значение         | Параметр                             | Значение         | Параметр                             | Значение         |
| $x_e$ , мм                           | $-2.92 \pm 0.69$ | $y_e$ , мм                           | $-1.04 \pm 0.42$ | $x_e$ , мм                           | $-1.98 \pm 0.54$ | $y_e$ , мм                           | $-0.60 \pm 0.38$ |
| $x'_e$ , мрад                        | $1.92 \pm 0.53$  | $y'_e$ , мрад                        | $-0.01 \pm 0.36$ | $x'_e$ , мрад                        | $1.30 \pm 0.36$  | $y'_e$ , мрад                        | $0.55 \pm 0.38$  |
| $\alpha$                             | $-0.46 \pm 0.10$ | $\alpha$                             | $0.54 \pm 0.11$  | $\alpha$                             | $0.03 \pm 0.01$  | $\alpha$                             | $0.84 \pm 0.17$  |
| $\beta$ , мм/мрад                    | $4.26 \pm 0.92$  | $\beta$ , мм/мрад                    | $5.48 \pm 1.14$  | $\beta$ , мм/мрад                    | $4.49 \pm 0.96$  | $\beta$ , мм/мрад                    | $5.13 \pm 1.06$  |
| $\gamma$ , мрад/мм                   | $0.28 \pm 0.06$  | $\gamma$ , мрад/мм                   | $0.24 \pm 0.05$  | $\gamma$ , мрад/мм                   | $0.22 \pm 0.05$  | $\gamma$ , мрад/мм                   | $0.33 \pm 0.07$  |
| $\epsilon$ , мм · мрад               | $3.03 \pm 0.66$  | $\epsilon$ , мм · мрад               | $4.54 \pm 0.95$  | $\epsilon$ , мм · мрад               | $3.42 \pm 0.73$  | $\epsilon$ , мм · мрад               | $5.90 \pm 1.22$  |
| $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $2.14 \pm 0.46$  | $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $3.20 \pm 0.67$  | $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $2.41 \pm 0.52$  | $\epsilon_{\text{норм}}$ , мм · мрад | $4.16 \pm 0.86$  |
|                                      | 0.93             |                                      | 1.23             |                                      | 0.84             |                                      | 1.37             |

3%. На рис. 12 показаны результаты томографии поперечного фазового портрета для обеих плоскостей на основе данных, полученных с помощью первого проволочного сканера (ПС1, см. рис. 2). На рис. 13 показаны такие же результаты, полученные с помощью второго проволочного сканера (ПС2). Значения параметров фазовых эллипсов для обоих профилометров представлены в табл. 3.

### 5.3. Результаты ИМПС

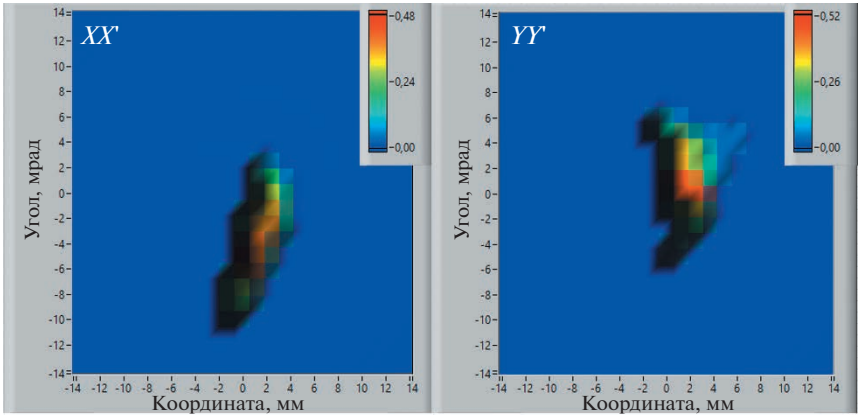
Данные ионизационного монитора были собраны дважды во время сеанса 2, с разной длительностью импульса пучка (32 и 100 мкс). Энергия пучка составила 209.87 МэВ для обоих изме-

рений. Порог отсечки профилей равен 1% при длительности пучка 32 мкс и 5% при длительности 100 мкс. На рис. 14 и 15 показаны результаты томографии поперечного фазового портрета для обеих плоскостей на основе данных, полученных с помощью ИМПС, с длительностью импульса 32 и 100 мкс соответственно. Значения параметров фазовых эллипсов для обоих профилометров представлены в табл. 4.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для дальнейшего обсуждения, анализа и сравнения результатов томографической реконструкции фазового портрета используются данные из

Фазовые портреты



Фазовые эллипсы

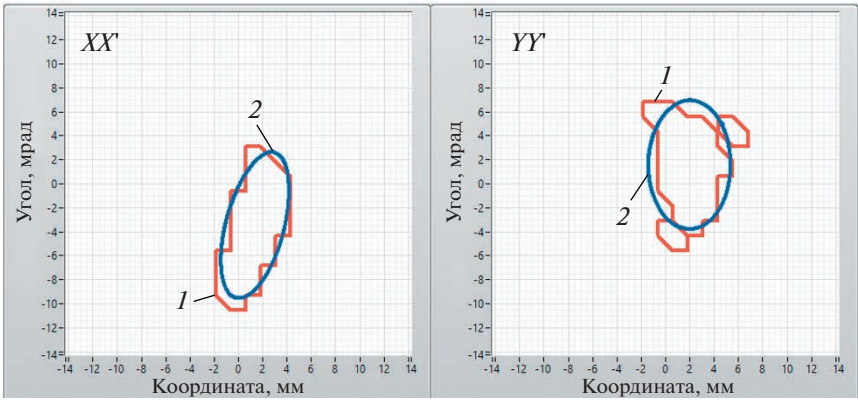


Рис. 10. Вверху — фазовые портреты, внизу — их огибающие (1) и фазовые эллипсы (2), реконструированные на основе данных МП, полученных в сеансе 1.

табл. 2–4 в качестве исходных параметров для моделирования динамики пучка.

6.1. Ограничения на диапазон изменения угла поворота

В табл. 5 представлены разности между томографически реконструированными и измеренными параметрами пучка, полученные с использованием данных многопроволочного профилометра, в единицах стандартных отклонений результатов метода томографической реконструкции. На основе данных МП на рис. 16 и 17 представлены результаты моделирования динамики положения центра тяжести и радиуса пучка соответственно.

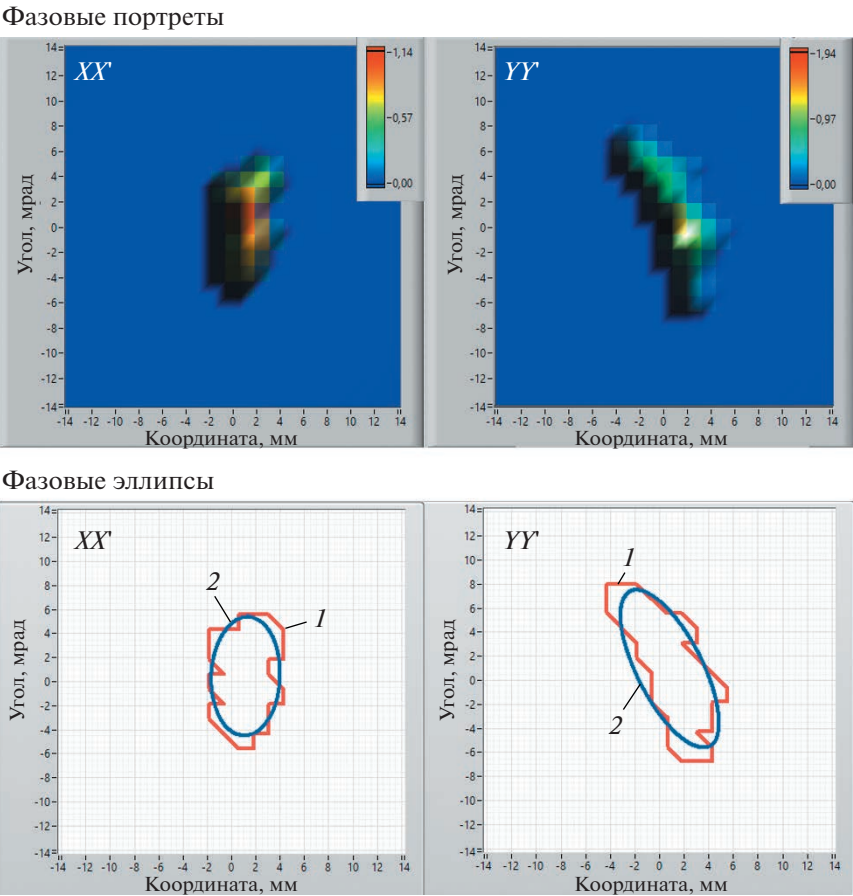
Из-за нестабильности пучка во время сеанса 1 не все измеренные профили были использованы для восстановления фазового портрета. Таким образом, угол поворота фазового портрета, полученный из матриц преобразования, для данных сеанса 1 по обеим плоскостям менялся в диапазо-

не около 20°, в то время как для результатов сеанса 2 — в диапазоне около 120°.

Все оценки погрешностей томографического алгоритма были сделаны в предположении изменения углов поворота на 180° при проведении измерений. На рис. 18 показано, что значение погрешности SART остается на уровне примерно 11%, если диапазон углов превышает 100° (угол  $\alpha$ , превышающий 180°, считается углом  $\alpha-180^\circ$  из-

Таблица 5. Разность между измеренными и томографически реконструированными параметрами пучка, измеренная в стандартных отклонениях томографического метода на основе данных с МП

| Параметр, стандартные отклонения | Сеанс 2  |          |
|----------------------------------|----------|----------|
|                                  | По оси x | По оси y |
| Разница положений                | 0.56     | 0.85     |
| Разница радиусов пучка           | 0.38     | 0.51     |



**Рис. 11.** Вверху – фазовые портреты, внизу – их огибающие (1) и фазовые эллипсы (2), реконструированные на основе данных МП, полученных в сеансе 2.

за особенностей SART). В случае диапазона в 20° погрешность SART увеличивается почти в два раза. Это накладывает ограничения на исходные данные, поскольку необходимо помнить о необходимости иметь большой диапазон угла поворота.

Таким образом, результаты измерений в сеансе 1 были признаны некорректными, и во время сеанса 2 все измерения проводились с диапазоном углов не менее 100°.

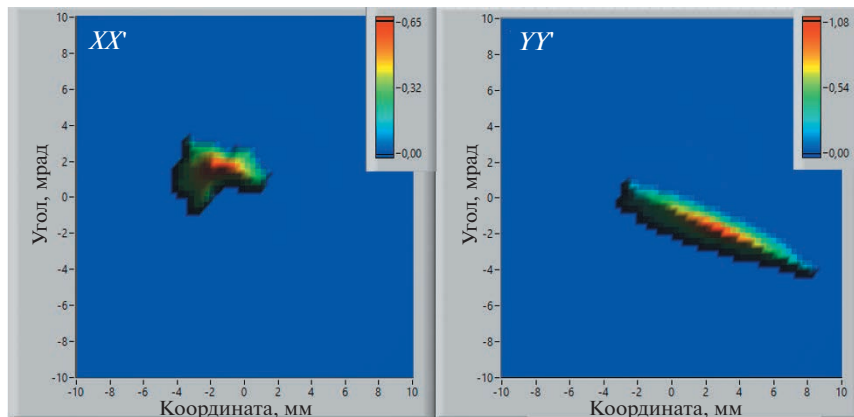
**Таблица 6.** Разность между измеренными и восстановленными параметрами пучка для томографии и метода поперечных профилей, измеренная в стандартных отклонениях соответствующего метода на основе данных ПС1

| Параметр, стандартные отклонения | Томография |          | МПП      |          |
|----------------------------------|------------|----------|----------|----------|
|                                  | По оси x   | По оси y | По оси x | По оси y |
| Разница положений                | 0.39       | 0.20     | 2.12     | 2.42     |
| Разница радиусов пучка           | 0.86       | 0.11     | 0.15     | 0.36     |

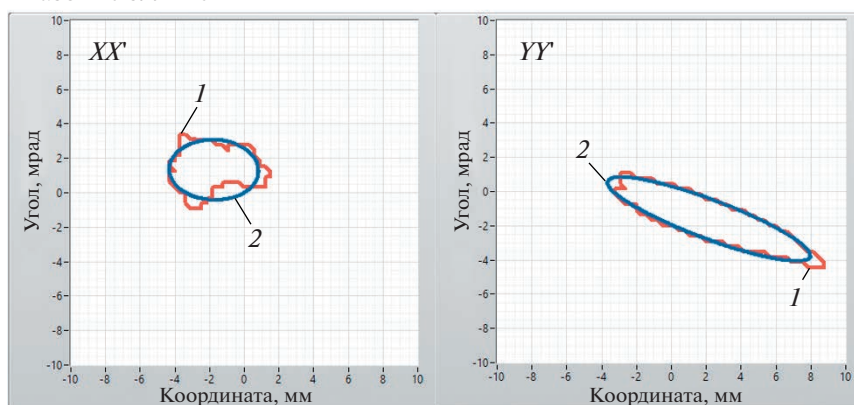
6.2. Сравнение с методом поперечных профилей

На основе данных ПС1 на рис. 19 и 20 показана динамика положения центра тяжести и радиуса пучка вдоль ионопровода для метода томографической реконструкции и метода поперечных профилей соответственно. Разность между измеренными и восстановленными значениями параметров пучка, выраженная в стандартных отклонениях результатов методов, представлена в табл. 6 для обоих методов. Погрешности измерений томографического метода приведены в табл. 2–4, погрешности МПП сравнимы с томографическими по величине. Все разности между измеренными и восстановленными радиусами пучка для обоих методов состав-

## Фазовые портреты



## Фазовые эллипсы



**Рис. 12.** Вверху — фазовые портреты, внизу — их огибающие (1) и фазовые эллипсы (2), реконструированные на основе данных с ПС1.

ляют менее одного стандартного отклонения, однако в случае восстановления положения центра тяжести пучка томографический метод показывает на порядок лучшую точность, чем метод поперечных профилей.

Различие в результатах реконструкции двух методов, основанных на одних и тех же данных, объясняется тем, как методы обрабатывают полученные данные. Томографическая реконструкция использует всю информацию, предоставляемую профилометром, и не накладывает никаких ограничений на параметры фазового портрета. Метод поперечных профилей использует только информацию о положении центра тяжести и численное значение среднеквадратичного размера пучка.

### 6.3. Рост нормализованного эмиттанта

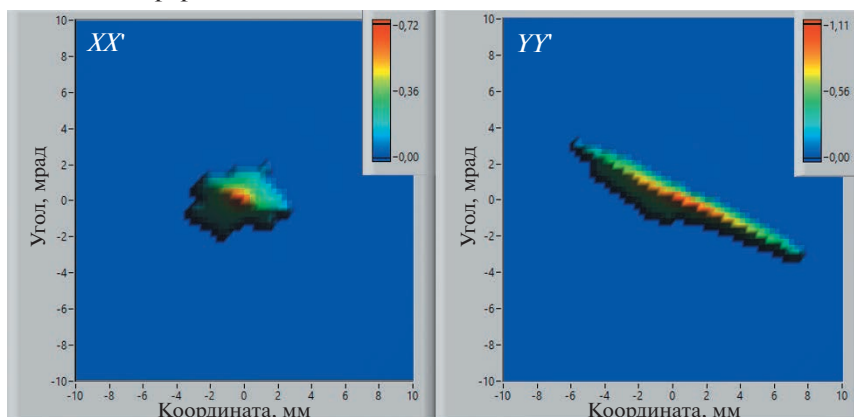
Значения нормализованного эмиттанта, рассчитанные на основе реконструированных фазо-

вых портретов в разных точках ускорителя, а также импульсный ток пучка, измеренный вблизи тех же точек, представлены на рис. 21. Расчет эмиттанта по фазовым портретам был проведен с помощью встроенного алгоритма LabVIEW для вычисления площадей фигур сложной формы, потому что, согласно принятой интерпретации результатов томографии, не каждый фазовый портрет можно рассматривать как эллиптический.

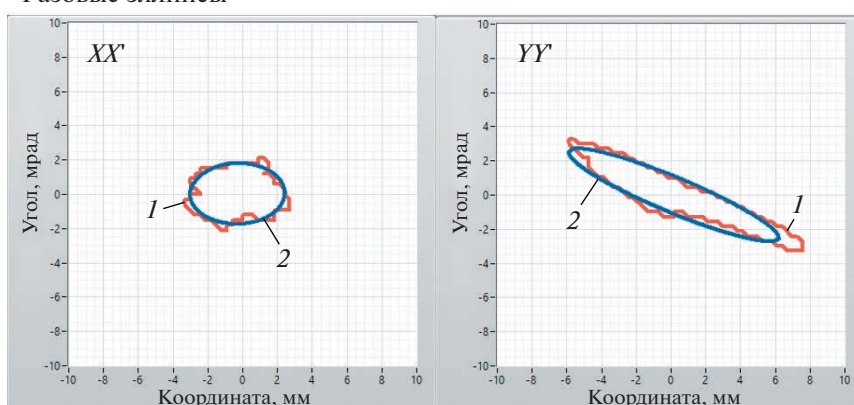
Сначала значения нормализованного эмиттанта фазовых портретов уменьшаются вместе со значениями импульсного тока пучка, но со второго проволочного сканера нормализованный эмиттанс для  $Y'Y'$ -плоскости начинает расти, в то время как импульсный ток продолжает уменьшаться. Однако при измерениях с длительностью импульса 32 мкс на ИМПС нет увеличения эмиттанта при тех же значениях импульсного тока, что и для пучка с длительностью 100 мкс. Для  $X'X'$ -плоскости значения нормализованного эмиттанта стабильны.



## Фазовые портреты



## Фазовые эллипсы



**Рис. 13.** Вверху – фазовые портреты, внизу – их огибающие (1) и фазовые эллипсы (2), реконструированные на основе данных с ПС2.

Учитывая значения погрешностей измерений, можно предположить, что эти расхождения связаны с неточностями метода томографической реконструкции. Однако существует и другая интерпретация этих результатов, которая объясняет динамику нормализованного эмиттанта и разницу между измерениями ИМПС при разных длительностях импульса тока пучка.

Причиной мог быть сбой в системе компенсации ВЧ-мощности ускоряющих резонаторов при нагрузке током пучка, что привело к существенному увеличению разброса частиц по импульсам в ускоряемых сгустках пучка длительностью 100 мкс. После ПС1 положение пучка вдоль ускорителя корректируется преимущественно в вертикальной плоскости с помощью дипольных магнитных корректоров, что приводит к пространственному разделению энергетического спектра пучка и, как следствие, к неэллиптическим формам фазового портрета. При измерении пучка с длительностью импульса 32 мкс увеличения

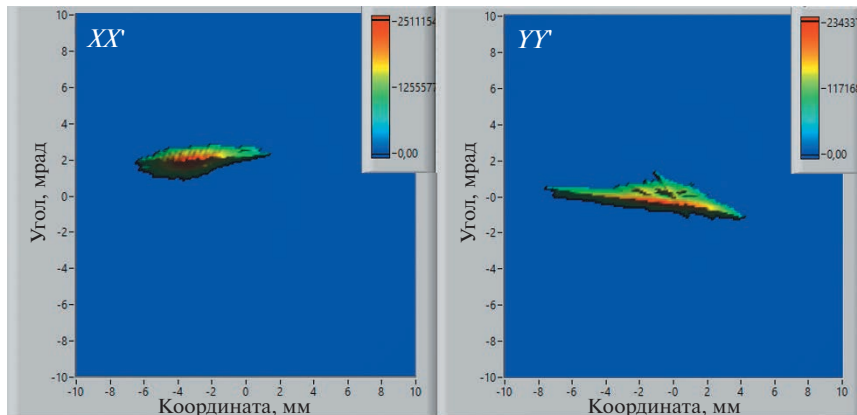
эмиттанта не происходит из-за равномерного ускорения частиц в сгустке с сохранением величины разброса по импульсам.

Описанные наблюдения показывают, что томографическая реконструкция не только является полезным инструментом для измерения поперечных параметров пучка, но также может быть использована в качестве индикатора неправильной продольной настройки резонансного ускорителя.

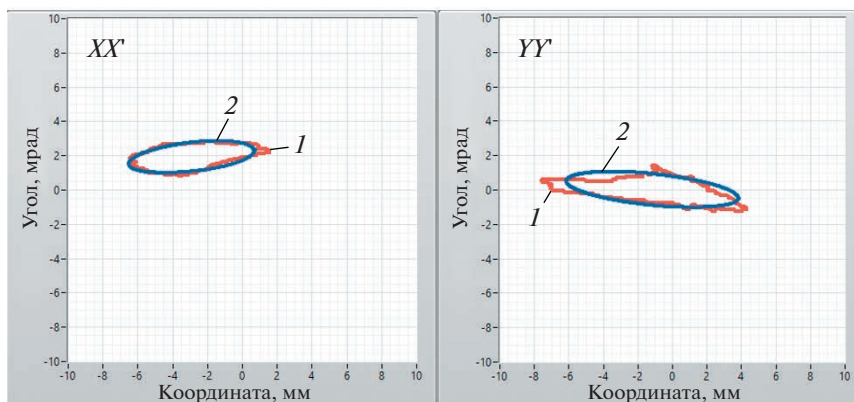
## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Томография поперечного фазового портрета пучка, основанная на быстром SART-алгоритме, реализована на сильноточном линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН для пучков средних и промежуточных энергий в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен мегаэлектронвольт. Несмотря на то что данный алгоритм томографии редко используется на ускорителях

## Фазовые портреты



## Фазовые эллипсы



**Рис. 14.** Вверху — фазовые портреты, внизу — их огибающие (1) и фазовые эллипсы (2), реконструированные на основе данных ИМПС (длительность пучка 32 мкс).

заряженных частиц, полученные результаты показывают, что разработанная процедура диагностики нечувствительна к типу профилометра, а созданное программное обеспечение может работать с любыми матрицами преобразования.

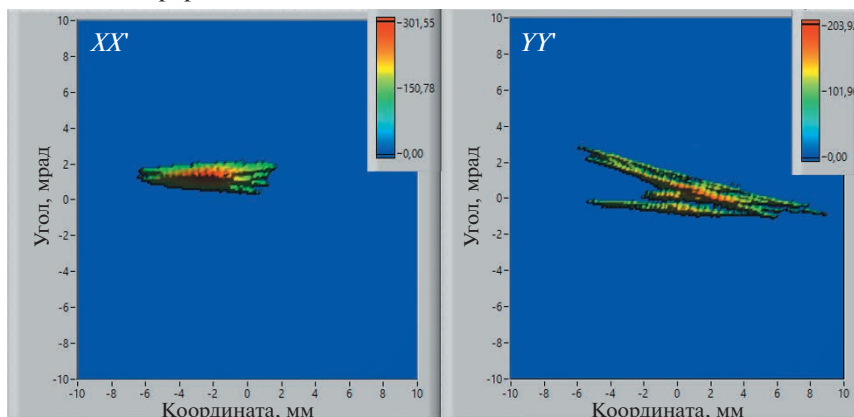
Быстрые онлайн-измерения поперечных фазовых портретов пучка могут быть выполнены с использованием каких-либо неразрушающих измерителей, как, например, ионизационный монитор поперечного сечения в случае ускорителя ИЯИ РАН, в то время как офлайн-процедура позволяет обрабатывать информацию из базы данных, полученную со всех остальных установленных профилометров, включая результаты предыдущих сеансов работы ускорителя, и обеспечивает более тщательную обработку данных для восстановления внутренней структуры поперечного фазового портрета пучка.

Сравнение томографического метода и метода поперечных профилей показало, что форма фазового портрета пучка может значительно отличаться от эллиптической, особенно во время про-

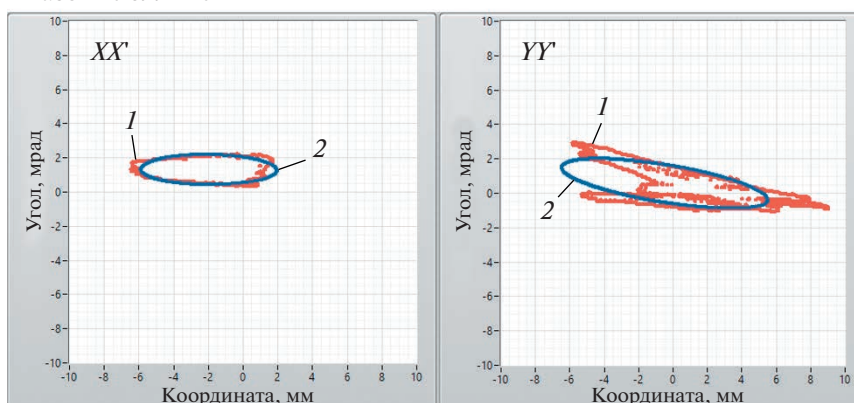
цедур настройки пучка. Это означает, что фазовые эллипсы, восстановленные с помощью метода поперечных профилей, должны быть каким-то образом верифицированы перед моделированием динамики пучка на основе полученных параметров Твисса в стандартных программах, использующих матричные методы трассировки пучка. В этом случае альтернативный томографический метод с внутренней процедурой проверки результатов более предпочтителен для восстановления фазового портрета и получения достоверных огибающих пучка.

Реализованный метод не требует установки дополнительного оборудования на ионопровод ускорителя и использует только существующие элементы магнитооптики и профилометры, при этом основная сложность практической реализации заключается в интеграции вычислительного ядра в автоматизированную систему управления ускорителем.

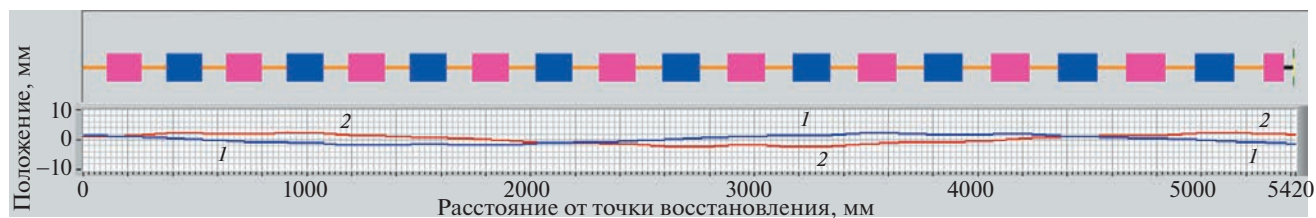
## Фазовые портреты



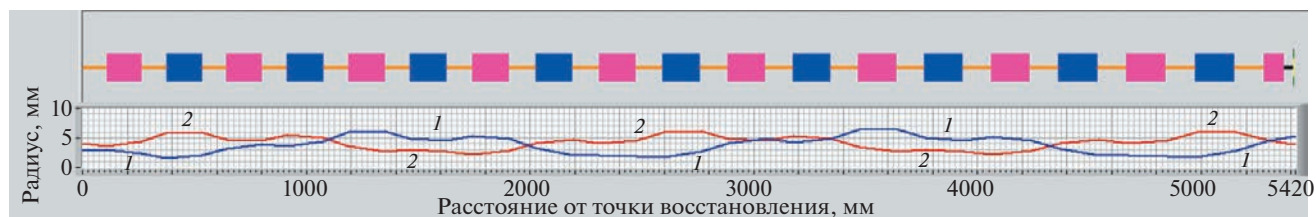
## Фазовые эллипсы



**Рис. 15.** Вверху – фазовые портреты, внизу – их огибающие (1) и фазовые эллипсы (2), реконструированные на основе данных ИМПС (длительность пучка 100 мкс).



**Рис. 16.** Схема расположения элементов магнитооптики первого резонатора с трубками дрейфа (вверху) и расчетная динамика положения центра тяжести пучка. На схеме прямоугольники – квадрупольные линзы, оранжевые линии – ускоряющие промежутки, черные линии – промежутки дрейфа. На графиках: 1 – динамика по оси  $X$ , 2 – по оси  $Y$ .



**Рис. 17.** Схема расположения элементов магнитооптики первого резонатора с трубками дрейфа (вверху) и расчетная динамика радиуса пучка. На схеме прямоугольники – квадрупольные линзы, оранжевые линии – ускоряющие промежутки, черные линии – промежутки дрейфа. На графиках: 1 – динамика по оси  $X$ , 2 – по оси  $Y$ .

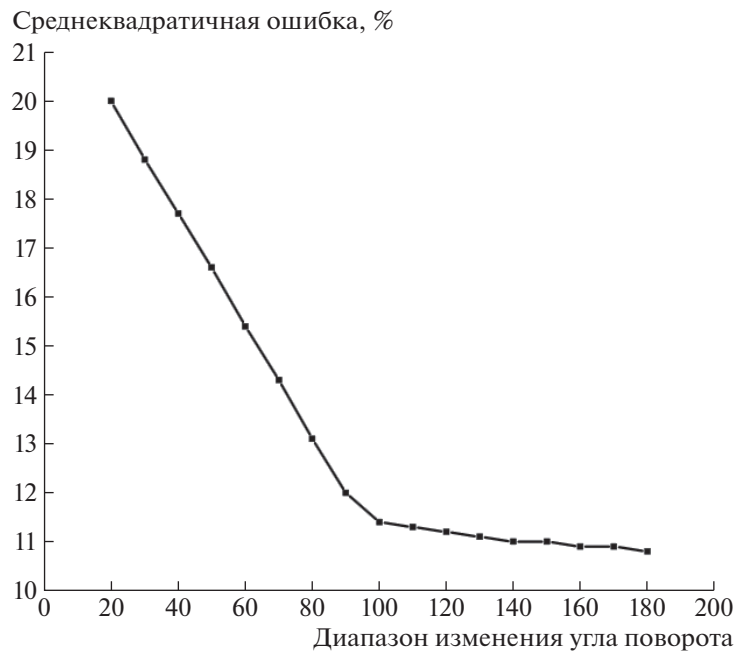


Рис. 18. Среднеквадратичная ошибка SART в зависимости от диапазона изменения угла поворота.

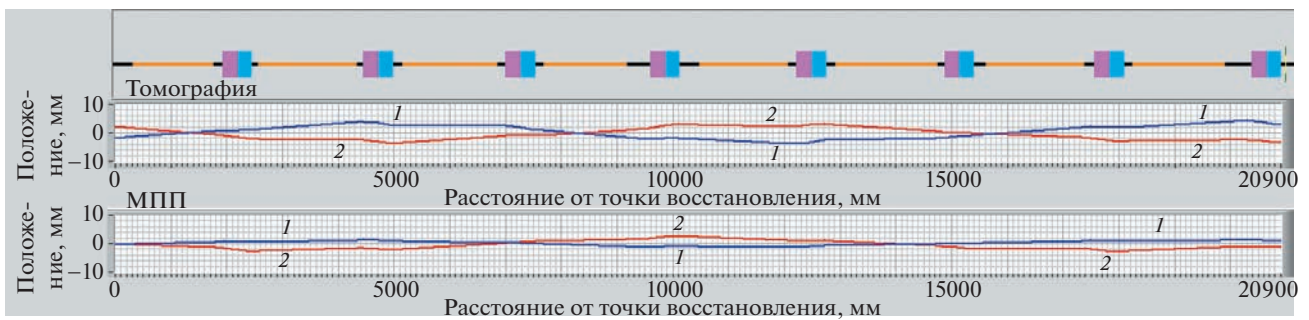


Рис. 19. Схема расположения элементов магнитооптики около согласующего резонатора и динамика положения пучка вдоль расчетного канала. На схеме прямоугольники — квадрупольные линзы, оранжевые линии — ускоряющие промежутки, черные линии — промежутки дрейфа. На графиках: 1 — динамика по оси X, 2 — по оси Y — по данным метода томографической реконструкции.

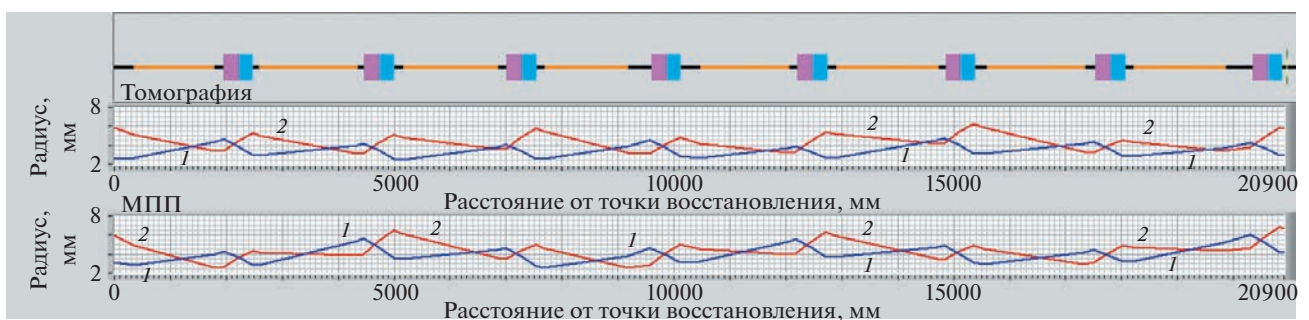
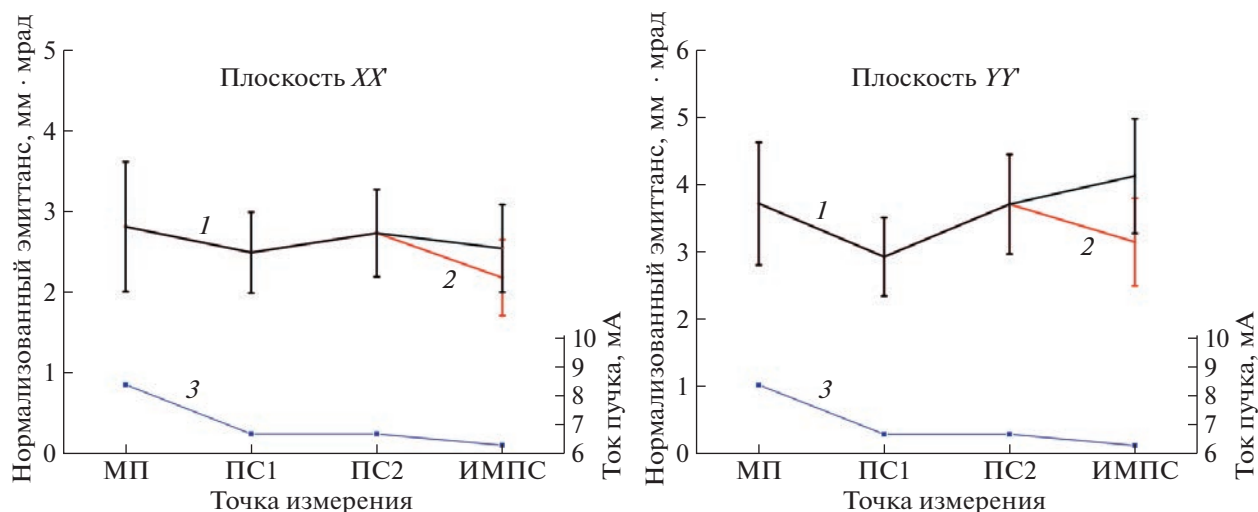


Рис. 20. Схема расположения элементов магнитооптики около согласующего резонатора и динамика радиуса пучка вдоль смоделированного канала. На схеме прямоугольники — квадрупольные линзы, оранжевые линии — ускоряющие промежутки, черные линии — промежутки дрейфа. На графиках: 1 — динамика по оси X, 2 — по оси Y — по данным метода поперечных профилей.





**Рис. 21.** Значения нормализованного эмиттанса для реконструированных фазовых портретов (черная 1 и красная 2 линии) и тока пучка (синяя линия 3) в зависимости от места измерения. 1 (черная линия) — для импульсов длительностью пучка 100 мкс, 2 (красная линия) — с длительностью пучка 32 мкс.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках работ по договору № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 года.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fork P.* Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. Germany, Darmstadt: Joint University Accelerator School, January – March, 2006. P. 71–74.
2. *Wiedemann H.* Particle Accelerator Physics. Fourth Edition. Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18317-6>
3. *Fraser J.S.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. NS-26. P. 1641. <https://doi.org/10.1109/TNS.1979.4330456>
4. *McKee C.B., O'Shea P.G., Madey J.M.J.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. Sect. A. 1995. V. 358. Iss. 1–3. P. 264. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01411-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01411-6)
5. *Asova G., Grabosch H.J., Groß M., Hakobyan L., Isaev I.V., Ivanisenko Y., Khojoyan M., Klemz G., Krasilnikov M., Mahgoub M., Malyutin D.A., Oppelt A., Otevrel M., Petrosyan B. et al.* // FEL 2011 – 33rd International Free Electron Laser Conference. 2011. P. 543.
6. *Reggiani D., Seidel M., Allen C.K.* // Proc. of IPAC'10. 2010. <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC10/papers/mope065.pdf>
7. *Gavrilov S., Feschenko A., Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I.* // JINST. 2014. V. 9. P01011. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/01/P01011>
8. *Malyutin D., Gross M., Isaev I., Khojoyan M., Kourkafas G., Krasilnikov M., Marchetti B., Otevrel M., Stephan F., Vashchenko G.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. Sect. A. 2017. V. 871. P. 105. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.043>
9. *Lallement J.B., Bellodi G., Dimov V.A., Lombardi A.M., Yarmohammadi Satri M.* // Proc. of LINAC2014. 2014. P. 913.
10. *Tan J.* // Proc. of ARIES. 2021. <https://agenda.ciemat.es/event/1229/contributions/2276/>
11. *Cathey B., Cousineau S., Aleksandrov A., Zhukov A.* // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. P. 064804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.064804>
12. *Georgiev G.Z., Krasilnikov M.* // Proc. of IBIC2019. 2019. (Malmö, Sweden, 08–12 September 2019) P. 586. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2019-WEPP029>
13. *Hock K.M., Wolski A.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. Sect. A. 2013. V. 726. P. 8. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.05.004>
14. *Crandall K.R.* “TRACE 3-D Documentation”. Los Alamos National Laboratory, 1987. LA–11054-MS.
15. *Reinhardt-Nickoulin P., Bragin S., Mirzajan A., Vasilyev I., Volodkevich O., Feschenko A., Gavrilov S.* // Proc. of RuPAC'12. 2012. P. 668.
16. <https://www.ni.com/en-us/support/model.pci-6259.html>
17. <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca780-75gm/#>
18. <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>
19. *Andersen A.H., Kak A.C.* // Ultrasonic Imaging. 1984. V. 6. Iss. 1. P. 81. [https://doi.org/10.1016/0161-7346\(84\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0161-7346(84)90008-7)
20. *Jiang M., Wang G.* // IEEE Transactions on Image Processing. 2003. V. 12. Iss. 8. P. 957. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.815295>
21. *Van der Walt S., Schönberger J.L., Nunez-Iglesias J., Boulogne F., Warner J.D., Yager N., Gouillart E., Yu T.* // PeerJ. 2014. 2: e453. <https://doi.org/10.7717/peerj.453>
22. *Titov A.I., Gavrilov S.A.* // Proc. Of RuPAC18. 2019. P. 489.