

НОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОТОННО-РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИОДНОРОДНОЙ МАССОВОЙ ТОЛЩИНОЙ

© 2023 г. Н.С. Шилкин^{1,*}, В.Б. Минцев¹, Д.С. Юрьев¹, А.В. Канцырев²,
А.В. Богданов², Д.С. Колесников², А.А. Голубев^{2,3}

¹ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Россия 142432 Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1

²НИЦ «Курчатовский институт»,
Россия 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, 1

³АО Наука и инновации, Россия 115035 Москва, Кадашевская набережная, 32/2, стр. 1

*E-mail: shilkin@fcp.ac.ru

Поступила в редакцию 24.11.2022; после доработки 14.12.2022

Принята к публикации 16.12.2022

Разработана методика расчета трансмиссии статических объектов с квазиоднородной массовой толщиной по единичному протонно-радиографическому изображению при условии гауссоподобного поперечного профиля пучка. Расчетные изображения трансмиссии предназначены для восстановления плотности исследуемых объектов. Выполнено протонно-радиографическое исследование статических мишеней на экспериментальной установке со специальной магнитной оптикой ПУМА при энергии протонов 800 МэВ и интенсивности 10^{10} частиц на изображение. Показано, что применение методики позволяет восстанавливать трансмиссию исследуемого объекта со средней относительной ошибкой около 1–1,2 %.

Ключевые слова: протонная радиография, протонно-радиографическое изображение, нормализация изображения, трансмиссия, обработка изображений, аппроксимация пространственного профиля пучка.

DOI: 10.31857/S0130308223010062, EDN: BV SXNT

ВВЕДЕНИЕ

Один из первых экспериментов по радиографированию статических объектов с помощью протонов был выполнен [1] в 1968 году. В исследовании была применена методика предельного поглощения протонов высокой энергии в исследуемом объекте с равномерной толщиной и было показано, что отличие массовой толщины объекта в 0,2 % может быть зарегистрировано с помощью радиочувствительной пленки. В работе [2] представлена иная методика, основанная на многократном кулоновском рассеянии протонов в исследуемом объекте, и предложено использовать ее для медицинской радиографии. Обе методики показали высокий контраст протонно-радиографических изображений при низком пространственном разрешении, обусловленным размытием изображения из-за многократного кулоновского рассеяния протонов в исследуемом объекте. В работе [3] был проведен анализ взаимодействия параллельного пучка протонов при постоянной плотности частиц с краем пластины постоянной толщины и показано, что размытие изображения объекта в области изменения плотности пропорционально произведению среднего угла многократного кулоновского рассеяния протонов и расстояния от объекта до детектора. Спустя 40 лет для компенсации эффектов кулоновского рассеяния была разработана и использована специальная магнитная ионно-оптическая схема [4]. Ионная оптика позволила минимизировать хроматические и геометрические аберрации протонных радиографических изображений, тем самым существенно улучшив их качество. Другой важной функцией ионной оптики является возможность регулировки оптимальной контрастности изображений исследуемых объектов, что достигается за счет установки коллиматора в плоскость Фурье ионной оптики установки. Коллиматор обеспечивает попадание на плоскость регистрации протонов с заданным диапазоном углов кулоновского рассеяния в объекте. Применение быстрых скинтилляторов [5] и цифровых камер с электронно-оптическим затвором обеспечило возможность регистрации нескольких протонно-радиографических изображений в разные моменты времени [6], что стало активно применяться в исследованиях быстропротекающих процессов. Протонно-радиографические установки с магнитной оптикой были построены в США [7, 8], России [9, 10] и Германии [11]. Эти установки использовались для исследования статических и динамических объектов с массовой толщиной от 25 мг/см² [12] до 500 г/см² [13] с помощью пучков протонов с энергией от 0,8 до 70 ГэВ.

Для реконструкции плотности исследуемых объектов было разработано несколько подходов обработки протонно-радиографических изображений. Все они основаны на определении ослабления протонного пучка, также называемого трансмиссией. Для описания взаимодействия протонного пучка с объектом обычно используется физическая модель, предполагающая гауссово угловое распределение кулоновского рассеяния протонов [4] и экспоненциальное затухание протонного пучка за счет ядерного рассеяния. Влияние хроматических aberrаций на протонно-радиографические изображения с большим диапазоном массовой толщины рассмотрены в работе [14]. Массовую толщину исследуемых объектов, т.е. интеграл плотности вдоль направления движения протонов, восстанавливают из нормализованных протонно-радиографических изображений с использованием аналитических выражений трансмиссии пучка [7]. Обратное преобразование Абеля применяется для восстановления объемной плотности объектов с осевой симметрией по одному радиографическому изображению [15]. В другой группе подходов используются различные аппроксимации распределения плотности в объекте с помощью параметрических моделей [14, 16]. Оптимальные параметры модели определяются из условия, например, минимума суммы отклонений интенсивности экспериментального изображения и его модели. В работе [17] представлена прямая детерминистская модель совместного учета ядерного и кулоновского рассеяния при протонной радиографии толстых объектов, которая итеративно применялась для расчета объемной плотности по измеренным протонно-радиографическим изображениям исследуемого объекта. Метод Монте-Карло также используется для численного моделирования протонно-радиографических исследований со статическими и динамическими объектами [18, 19].

Протонно-радиографические изображения нормализуются при попиксельном делении изображения исследуемого объекта на изображение протонного пучка, получаемое в отсутствие объекта. В случае нестабильности позиции и поперечного профиля пучка изображение пучка обычно определяется расчетным образом, используя области экспериментального изображения с известной массовой толщиной при известном химическом составе объекта. Части протонно-радиографического изображения без объекта имеют трансмиссию равную 100 %, что дает надежную информацию для восстановления изображения пучка.

Иногда исследуемый объект с неизвестной массовой толщиной полностью занимает поле зрения установки. В этом случае нормализация изображения объекта также возможна, но при некоторой дополнительной информации. Одним из таких комплексов условий может быть квазиоднородность исследуемого объекта при известном типе функциональной зависимости поперечного профиля пучка от координат. Цель работы состоит в разработке методики расчета изображения трансмиссии исследуемого объекта с почти однородной массовой толщиной по его протонно-радиографическому изображению, предполагая, что пространственный профиль пучка описывается гауссоподобной функцией.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные данные в работе были получены на протонном микроскопе с использованием магнитной оптики ПУМА [20]. Протонный микроскоп был разработан для исследования статических и динамических объектов с массовой толщиной до 20 г/см² при поле обзора установки ~18 мм с помощью пучка протонов с энергией 800 МэВ. В проведенных экспериментах временная структура импульса протонного пучка состояла из четырех последовательных банчей (сгустков протонов) с интенсивностью около 10¹⁰ протонов на банч, следующих — с интервалом 250 нс. Ширина временного профиля одного банча протонного импульса на полувысоте составляла около 70 нс. Биметаллическая составная пластина из стали и алюминия толщиной 7 мм на входе протонно-радиографической установки обеспечивала формирование пучка с требуемыми размерами и гауссоподобным пространственным распределением интенсивности в плоскости установки исследуемых объектов. Секция согласования ионно-оптической схемы включала три электромагнитные квадрупольные линзы. Секция формирования изображения ионной оптики установки состояла из четырех квадрупольных линз, изготовленных из Nd—Fe—В-постоянных магнитов [21]. Латунный коллиматор с внутренним диаметром 7 мм и длиной 35 мм устанавливали в плоскости установки Фурье. Сцинтиллятор из силиката лютетия толщиной 4 мм использовали для конверсии потока протонов в оптическое изображение, направляемое зеркалом на несколько 14-битных ПЗС камер S2C-017 фирмы Силар, оснащенных электронно-оптическими затворами на базе микроканальных пластин.

Каждая из камер регистрировала изображение объекта при прохождении отдельного банча протонов. Изображения пучка размером 1024 на 1024 пикселей записывали в формате TIFF с глубиной цвета 16 бит. Временной профиль протонного пучка регистрировался быстрым поясом Роговского Bergoz FCT-082 05:1. Исследуемые объекты [22] располагались в мишенной камере при давлении $\sim 10^{-3}$ торр. На установке были выполнены исследования свойств конденсированных взрывчатых материалов, ударно-сжатой плазмы газов, ударного нагружения металлических пластин [23].

ОБРАБОТКА ПРОТОННО-РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Анализ и обработка экспериментальных протонно-радиографических изображений мишеней осуществляли в свободно распространяемой программе ImageJ [24]. Вначале проводили коррекцию пространственной неоднородности светового выхода сцинтиллятора и дефектов матрицы электронной камеры [25]. Корректирующую маску вычисляли с помощью нескольких протонно-радиографических изображений пучка без исследуемого объекта, предполагая гауссоподобный поперечный профиль пучка. Экспериментальные протонно-радиографические изображения исследуемого объекта попиксельно делились на изображение корректирующей маски. Небольшое количество случайных пикселей изображения из-за взаимодействия фонового радиационного излучения с матрицей камеры имело интенсивность много большую, чем интенсивность свечения окружающих их пикселей. Значения интенсивности таких пикселей заменялись значениями, полученными при квадратичной аппроксимации в окрестности радиусом 32 пикселя. Затем скорректированные протонно-радиографические изображения нормализовались, т.е. делились на изображение пучка без исследуемого объекта.

Из-за нестабильности работы ускорителя положение центра, форма и размеры пучка изменялись от сброса к сбросу пучка, поэтому требовалось определять поперечный пространственный профиль пучка для каждого его банча. Профиль пучка восстанавливался, используя области экспериментального протонно-радиографического изображения с известной трансмиссией или области изображения, соответствующие объекту с известной геометрией, распределением плотности и элементным составом.

Пространственный профиль пучка наиболее легко восстанавливается из протонно-радиографических изображений с большими областями, соответствующими одинаковой массовой толщине однородного исследуемого объекта. Процедура нормализации изображения объектов с почти однородной плотностью состояла из трех этапов. На первом шаге обработки находились области изображения объекта с одинаковой трансмиссией пучка. Для этого пространственный профиль изображения объекта аппроксимировался двумерной гауссоподобной функцией. Экспериментальное протонно-радиографическое изображение объекта делилось на найденную расчетную аппроксимирующую функцию профиля пучка. Координаты пикселей с одинаковыми значениями трансмиссии находились на полученном предварительно нормализованном изображении объекта. Определялся массив пикселей с наиболее распространенными значениями. На втором шаге обработки пиксели изображения объекта, найденные на первом шаге, использовались для конечной аппроксимации профиля пучка с помощью двумерной гауссоподобной функции. Следующее приближение нормализованного изображения объекта вычислялось как отношение экспериментального протонно-радиографического изображения и вычисленного изображения пучка. Это нормализованное изображение строилось в единицах трансмиссии выбранной группы пикселей. На третьем шаге расчетное изображение объекта нормировалось в абсолютных единицах трансмиссии с использованием областей изображения, отвечающих нулевой массовой толщине, где трансмиссия равна 100 %. Области изображения с известной трансмиссией пучка также можно использовать для перенормировки.

Данная процедура нормализации изображения основана на том, что изображение протонного пучка, прошедшего через сплошной объект равномерной толщины, сохраняет форму пространственного распределения частиц, но ценой изменения начального углового распределения частиц. Изображение прошедшего через объект пучка протонов описывается гауссоподобной функцией, аналогичной функции, описывающей изображение пучка без исследуемого объекта. Параметры этой функции зависят от настройки протонного микроскопа и массовой толщины исследуемого объекта.

ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОЧТИ ОДНОРОДНОЙ МАССОВОЙ ТОЛЩИНОЙ

Статические мишени с квазипостоянной массовой толщиной изучали на протонном микроскопе ПУМА. Одним из исследуемых объектов служила пластина из органического стекла с выгравированными на поверхности латинскими буквами **I**, **T**, **E** и **P**. Фотография мишени показана на рис. 1а. Толщина пластины составляла 8 мм, глубина гравировки букв — 0,5 мм. Пластина была ориентирована таким образом, чтобы протонный пучок вначале проходил через грань с гравировкой, а затем выходил через противоположную грань с гладкой поверхностью. Нормализованное изображение пластины представлено на рис. 1б. Оно было восстановлено по одному протонно-радиографическому изображению с использованием вышеописанного алгоритма. Черные области в углах изображения лежат вне поля зрения протонного микроскопа. Вертикальные линии на рис. 1б показывают координаты одномерных массивов пикселей, которые применяли для построения профилей на рис. 2.

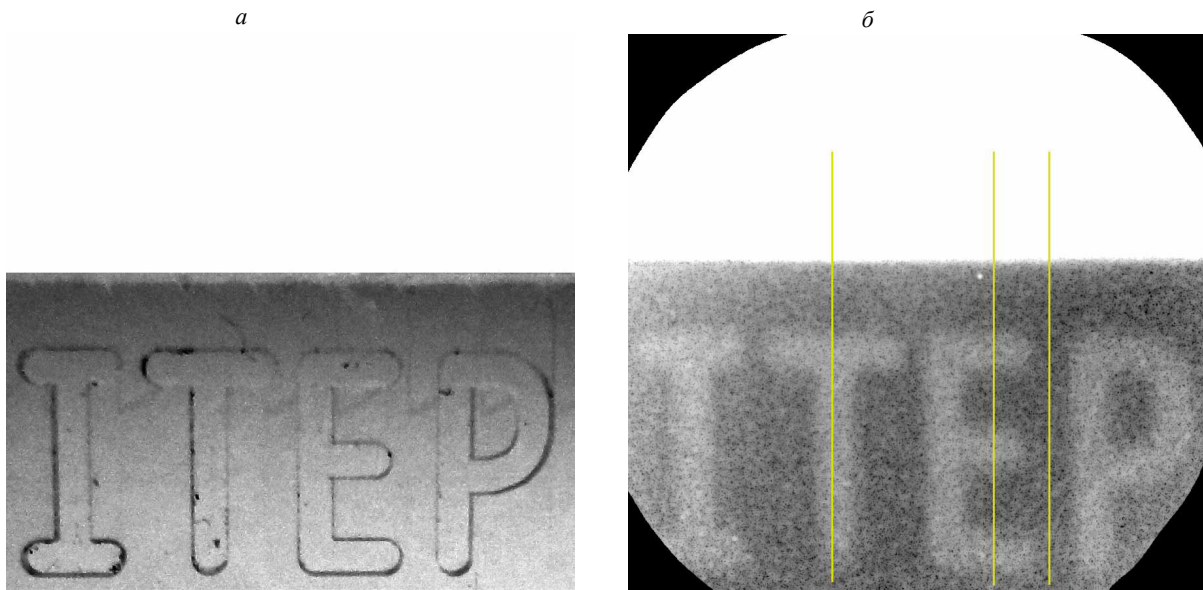


Рис. 1. Пластина из оргстекла с выгравированными буквами **I**, **T**, **E** и **P**:
 а — фотография; б — нормализованное протонно-графическое изображение.

При вычислении пространственного профиля пучка использовали данные по интенсивности пикселей изображения пластины за исключением областей около ее края и выгравированных букв, что необходимо для устранения из рассмотрения эффектов, описываемых интегральными выражениями. Протонно-радиографическое изображение поля обзора установки FOV разбивалось на три группы пикселей, которые принадлежали изображению пучка FOV_{BEAM} , изображению пластины FOV_{OBJ} без букв и областей с буквами и около среза пластины FOV_{LET} . Пиксели изображения пластины оставались без изменений. Пиксели из множества FOV_{LET} исключались из рассмотрения. Значения интенсивности пикселей изображения пучка FOV_{BEAM} делились на постоянный множитель M , который компенсировал отсутствие ослабления пучка в области, не занимаемой пластиной. После этого поперечный профиль пучка аппроксимировался двумерной гауссоподобной функцией. Множитель M определялся из условия минимума суммы квадратов отклонений интенсивности скорректированного экспериментального изображения и аппроксимирующей гауссоподобной функции $G(x, y) = \exp(ax^2 + by^2 + cxy + dx + fy + g)$:

$$\min \left(\sum_{FOV_{BEAM}} (G(x, y) - I_{ex}(x, y)/M)^2 + \sum_{FOV_{OBJ}} (G(x, y) - I_{ex}(x, y))^2 \right), \quad (1)$$

где $I_{ex}(x, y)$ — интенсивность пикселя экспериментального изображения с координатами (x, y) ; a, b, c, d, f, g — параметры гауссоподобной функции $G(x, y)$.

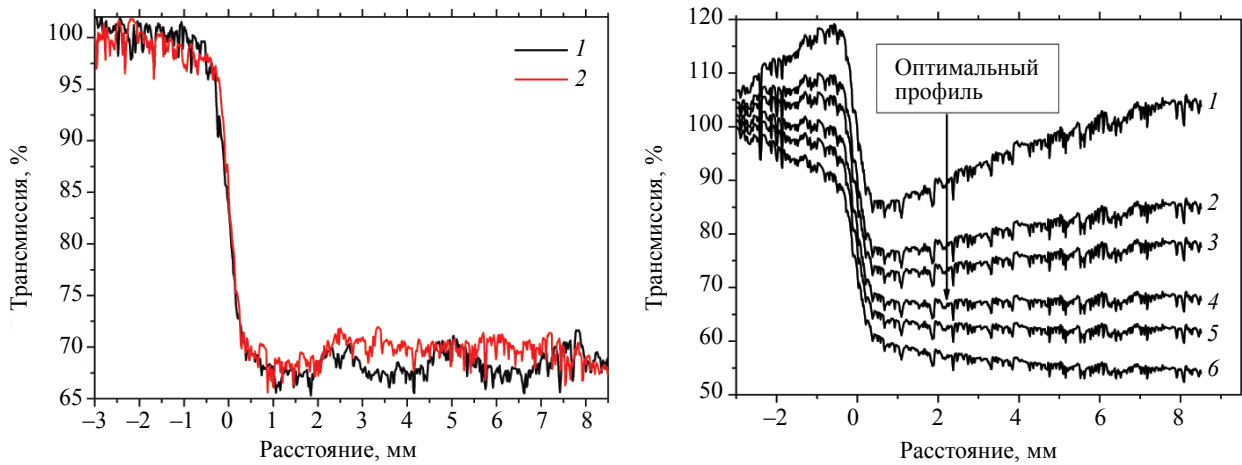


Рис. 2. Вертикальные профили нормализованного изображения:

a — при $M=1,47$ (1 — профиль, проходящий через горизонтальные элементы буквы **Е**; 2 — профиль, проходящий через букву **Т**);
б — расчетные профили, проходящие между буквами **Е** и **Р** при различных M (1 — $M = 1$; 2 — $M = 1,2$; 3 — $M = 1,3$; 4 — $M = 1,47$;
 5 — $M = 1,6$; 6 — $M = 1,8$).

Средняя относительная ошибка определения интенсивности каждого пикселя нормализованного изображения пластины изменялась от 1,0 до 1,2 %. Она оценивалась для пикселей изображения, относящихся к одинаковой массовой толщине пластины. Два вертикальных профиля интенсивности единичного изображения показаны на рис. 2 для иллюстрации качества нормализации. Один профиль построен через букву **Т**. Второй профиль проведен параллельно и проходит в том числе через горизонтальные элементы буквы **Е**. По оси абсцисс показано расстояние от границы пластины с вакуумом, положительные значения координат соответствуют пластине. Средняя величина трансмиссии протонного пучка через пластину составила 68 %, которая соответствует параметру $M = 1,47$ ($1/M \approx 0,68$). Трансмиссия в области, не занимаемой объектом, принималось равной 100 %. Профили нормализованной интенсивности, построенные в областях с однородной массовой толщиной, практически совпадают.

Значения трансмиссии для параллельного протонного пучка в вакууме и для пластины постоянной толщины должны быть близки к соответствующим уровням. Исключение составляет переходная область на границе пластина—вакуум, где пространственный профиль трансмиссии пучка описывается с помощью функции ошибок. Отсюда следует, что чем дальше луч протонов от границы раздела двух соседствующих фрагментов с постоянными толщинами, тем лучше качество нормализации.

На рис. 2б приведена иллюстрация влияния значения параметра M на качество нормализации. Для этого с использованием условия (1) были рассчитаны параметры a, b, c, d, f и g функции $G(x, y)$, аппроксимирующей пространственный профиль пучка при фиксированном M для изображения на рис. 1а. Расчетные вертикальные кривые интенсивности, построенные при разных значениях M для фиксированного пространственного профиля, находящегося на изображении между буквами **Е** и **Р**, показаны на рис. 2б. Оптимальная нормализация достигается для значения $M = 1,47$, при котором реализуется минимум выражения (1), а соответствующий профиль 4 на рис. 2б наилучшим образом приближен к ступенчатой функции.

Пространственное разрешение установки σ определялось с помощью аппроксимации профилей трансмиссии $T(x)$ в окрестности ступенчатых перепадов массовой толщины с помощью функции ошибок:

$$T(x) = T_1 + T_2 \operatorname{erf}\left(-\frac{x - x_0}{\sigma\sqrt{2}}\right), \tag{2}$$

где T_1 и T_2 — свободные параметры; x_0 — координата границы ступенчатого изменения массовой толщины пластины.

Пространственное разрешение протонного микроскопа по вертикальной оси σ_y составило величину около 250 мкм. Оно определялось по вертикальным профилям интенсивности изображе-

ния, построенным на границе пластина—вакуум. Пространственное разрешение по горизонтальной оси σ_x оценивалось на уровне 150 мкм по горизонтальным профилям интенсивности изображения, проходящим через скачки плотности на границах пластины и выгравированных букв.

Значение угла аксептанса коллиматора θ_c было уточнено в результате использования теоретических выражений, описывающие трансмиссию, и измеренного значения ослабления протонного пучка в пластине. Суммарная трансмиссия в сплошном однородном объекте T находится как произведение трансмиссии T_{nucl} из-за ослабления пучка в ядерных взаимодействиях и трансмиссии $T_{MCS}(\theta_c)$, определяемой кулоновским рассеянием в мишени и ослаблением пучка в коллиматоре:

$$T = T_{MCS} T_{nucl} 100 \%. \quad (3)$$

Изменение трансмиссии пучка вследствие взаимодействия протонов с ядрами материала мишени описывается следующим выражением:

$$T_{nucl} = \exp\left(-\frac{l}{\lambda_T}\right), \quad (4)$$

где l — массовая толщина исследуемой мишени; λ_T — длина ядерного взаимодействия материала мишени.

Член T_{MCS} рассчитывали с помощью выражения (3), используя измеренную суммарную трансмиссию T и вычисленную с помощью выражения (4) трансмиссию T_{nucl} . Массовую толщину пластины находили как произведение плотности органического стекла ρ на измеренное значение толщины пластины h .

Трансмиссия T_{MCS} из-за кулоновского рассеяния в мишени и ослабления пучка в коллиматоре определяется следующими выражениями [8]:

$$T_{MCS} \approx 1 - \exp\left(-\frac{k}{l}\right), \quad k = \left(\frac{p\beta c\theta_c}{14,1\text{МэВ}}\right)^2 \frac{X_0}{2}, \quad (5)$$

где p — момент импульса протонов; c — скорость света; β — скорость протонов в единицах скорости света; l — массовая толщина; X_0 — радиационная длина рассеивающей среды; θ_c — угол аксептанса коллиматора.

Значения параметров X_0 и λ_T органического стекла (полиметилметакрилат) взяты из работы [26]. Выражения (4) и (5) были использованы для вычисления параметра θ_c , значение которого составило 2,7 мрад.

Для восстановления плотности исследуемых объектов с меньшей погрешностью требуется снизить неопределенность в нормализованном изображении. Значение интенсивности сигнала в каждом пикселе протонно-радиографического изображения объекта изменяется случайным образом от сброса к сбросу пучка. Эту флуктуацию сигнала можно рассматривать как шум и устранять методами математической обработки. Уменьшение радиографического шума на изображении объекта было достигнуто усреднением по нескольким нормализованным изображениям. Применялось медианное усреднение, при котором результирующее изображение состояло из пикселей с интенсивностью, равной медианному значению интенсивности пикселей с теми же координатами и взятыми с разных изображений. Фрагмент протонно-радиографического изображения пластины с буквами показан на рис. 3 при медианном усреднении по 3, 7 и 49 изображениям соответственно.

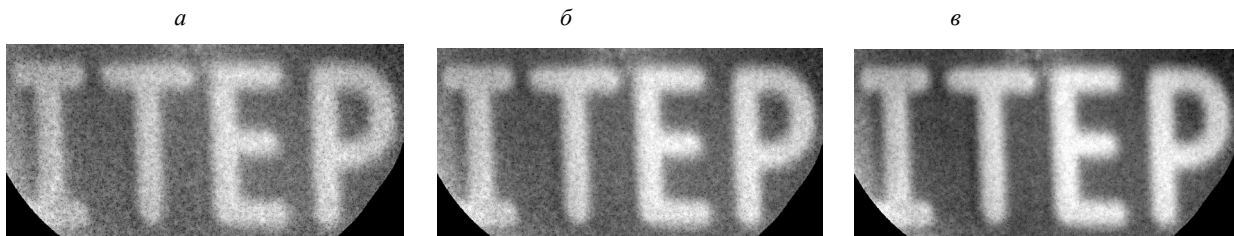


Рис. 3. Медианно-усредненное нормализованное изображение пластины:
 а — использовано 3 изображения; б — использовано 7 изображений; в — использовано 49 изображений.

Данный подход может применяться для нормализации протонно-радиографических изображений мишеней с квазиоднородной массовой толщиной и неизвестным распределением плотности. Дополнительным условием нормализации очевидно является сохранение соотношения элементного состава радиографируемого объекта во всем объеме. Возможно локальное отступление от соотношения элементов в объеме мишени, если соответствующие области занимают малую часть протонно-радиографического изображения. Нормализация в абсолютных величинах возможна при наличии области изображения с известной трансмиссией, которая может определяться как экспериментально, так и расчетным образом. Биологические объекты отвечают вышеописанным требованиям, кроме того, они обладают сложной структурой и состоят из элементов с различной плотностью и различным элементным составом. Реконструированное нормализованное изображение аквариумной рыбки Данио-рерио, внедренной в парафиновый блок толщиной 8 мм, показано на рис. 4б, ее фотография представлена на рис. 4а. Парафиновую заливку использовали для сохранения внутренней структуры рыбки, когда ее помещали в вакуум в мишенной камере установки ПУМА. Процедура предварительной обработки исследуемого биологического объекта описана в [27]. Пространственный профиль пучка реконструировали по одному экспериментальному протонно-радиографическому изображению и использовали для нормализации этого изображения в произвольных единицах. Толщина парафина в различных частях объекта варьировалась и абсолютные измерения трансмиссии в фиксированной области парафина не проводились. Средняя трансмиссия в парафине без исследуемого объекта принималась равной 100 % для задания реперного значения. Среднюю точность определения трансмиссии оценивали по областям изображения парафинового блока без рыбки, она близка к 1 %.

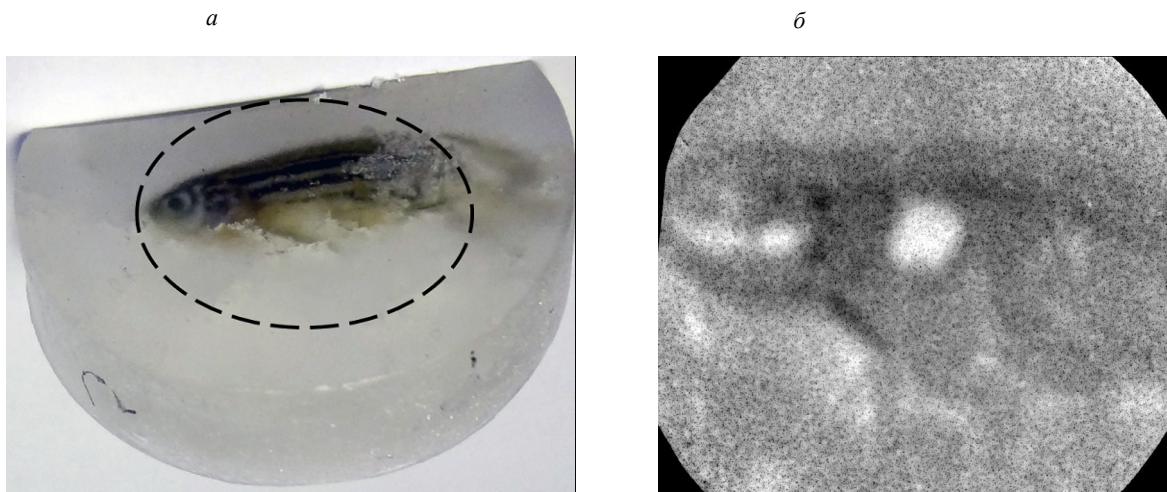


Рис. 4. Рыбка Данио-рерио в парафине:

а — фотография, штриховой линией отмечена граница поля зрения микроскопа; *б* — нормализованное протонно-графическое изображение.

Качество изображения может быть также улучшено при использовании медианного усреднения по нескольким изображениям. Результаты применения усреднения по 15 и 49 нормализованным изображениям показаны на рис. 5а и б. Относительное изменение трансмиссии в области изображения аквариумной рыбки, внедренной в парафин, находится в пределах $\pm 4\%$. В расчетах, проведенных ранее в [27], относительное изменение трансмиссии исследуемого объекта (рыбки) получить не удалось, а было представлено только протонно-радиографическое изображение объекта с относительной шкалой яркости.

Ранее для построения нормализованных протонно-радиографических изображений объектов, занимающих все поле зрения микроскопа, использовали иной подход [27], основанный на усреднении изображений исследуемого объекта и протонного пучка и последующем делении их друг на друга. Для усреднения отбирали изображения, полученные при примерно одинаковой интенсивности и положении протонного пучка. Из-за нестабильности пространственных параметров пучка требовалось около сотни радиографических изображений исследуемого объекта и столько же изо-

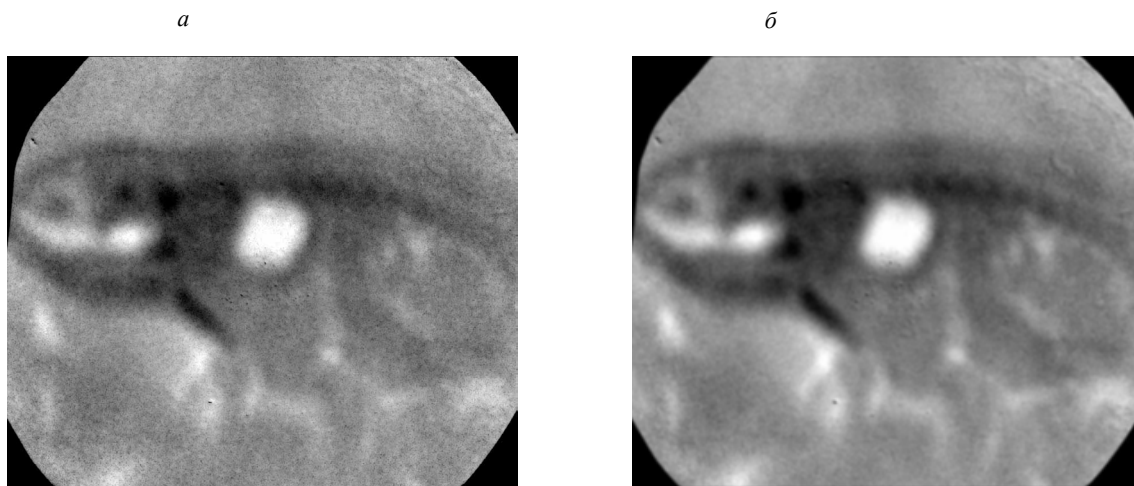


Рис. 5. Медианно-усредненное нормализованное изображение аквариумной рыбки в парафине: *а* — использовано 15 изображений; *б* — использовано 49 изображений.

бражений без установленного объекта. При этом нормализация изображений была неполной в том смысле, что позволяла проводить локальное сравнение изменения трансмиссии различных частей исследуемого объекта в произвольных единицах. Предлагаемый подход предназначен для нормализации протонно-радиографических изображений с исследуемым объектом, используя только одно изображение при условии квазиоднородности мишени. Он также позволяет проводить абсолютные измерения изменения трансмиссии по всему полю зрения микроскопа в абсолютных или относительных величинах в зависимости от наличия или отсутствия областей изображения с известной трансмиссией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика нормализации протонно-радиографических изображений исследуемых объектов с почти однородной массовой толщиной разработана для обработки экспериментальных данных, полученных на протонном микроскопе с магнитной оптикой. Методика позволяет рассчитывать изображение в единицах трансмиссии по единичному протонно-радиографическому изображению исследуемого объекта при условии аппроксимации поперечного профиля пучка двумерной гауссоподобной функцией. Процедура нормализации включает учет пространственной неоднородности светового выхода сцинтиллятора, дефектов матрицы электронной камеры, вызванных радиационным повреждением отдельных пикселей в том числе. Численный алгоритм нормализации реализован в программе анализа и обработки изображений ImageJ. Выполнены протонно-радиографические исследования статических объектов на протонном микроскопе ПУМА. Медианное усреднение по нескольким нормализованным протонно-радиографическим изображениям применялось для уменьшения радиографического шума и дополнительного улучшения качества изображений. Показано, что применение методики позволяет описать трансмиссию каждого пикселя единичного нормализованного изображения объекта со средней точностью 1—1,2 % по всему полю зрения протонного микроскопа. Горизонтальное разрешение протонного микроскопа в проведенных экспериментах составило 150 мкм, а вертикальное — 250 мкм.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме 0089-2019-0001, № государственной регистрации ААА-А19-119071190040-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koehler A.M. Proton radiography // *Science*. 1968. V. 160. No. 3825. P. 303—304. <https://doi.org/10.1126/science.160.3825.303>
2. West D., Sherwood A.C. Radiography with 160 MeV protons // *Nature*. 1972. V. 239. P. 157—159. <https://doi.org/10.1038/239157B0>
3. West D., Sherwood A.C. Proton-scattering radiography // *Non-destructive Testing*. 1973. V. 6. P. 249—257. [https://doi.org/10.1016/0029-1021\(73\)90072-8](https://doi.org/10.1016/0029-1021(73)90072-8)

4. *Mottershead C.T., Zumbro J.D.* Magnetic optics for proton radiography // Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conf. 1997. V. 2. Comyn M. et al. Eds. Vancouver: IEEE. P. 1397—1399. <https://doi.org/10.1109/PAC.1997.750705>
5. *Merill F.E.* Flash proton radiography // Reviews of Accelerator Science and Technology. 2015. V. 08. P. 165—180. <https://doi.org/10.1142/S1793626815300091>
6. *Yates G., Albright K., Alrick K., Gallegos R., Galyardt J., Gray N., Hogan G., Holmes V., Jaramillo S., King N., McDonald T., Morley K., Morris C., Numkena D., Pazuchanics P., Riedel C., Sarracino J., Ziock H.J., Zumbro J.* An intensified/shuttered cooled CCD camera for dynamic proton radiography // Proc. SPIE 3302, Digital Solid State Cameras: Designs and Applications. 1998. V. 3302. Ed. Williams G.M. SPIE. P. 140—151. <https://doi.org/10.1117/12.304577>
7. *King N.S.P., Ables E., Adams K., Alrick K.R., Amann J.F., Balzar S., Barnes Jr P.D., Crow M.L., Cushing S.B., Eddleman J.C., Fife T.T., Flores P., Fujino D., Gallegos R.A., Gray N.T., Hartouni E.P., Hogan G.E., Holmes V.H., Jaramillo S.A., Knudsson J.N., London R.K., Lopez R.R., McDonald T.E., McClelland J.B., Merrill F.E., Morley K.B., Morris C.L., Naivar F.J., Parker E.L., Park H.S., Pazuchanics P.D., Pillai C., Riedel C.M., Sarracino J.S., Shelley Jr F.E., Stacy H.L., Takala B.E., Thompson R., Tucker H.E., Yates G.J., Zumbro H.-J., Zumbro J.D.* An 800-MeV proton radiography facility for dynamic experiments // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1999. V. 424. P. 84—91. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01241-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01241-8)
8. *Morris C.L., Ables E., Alrick K.R., Aufderheide M.B., Barnes P.D., Buescher K.L., Cagliostro D.J., Clark D.A., Clark D.J., Espinoza C.J., Ferm E.N., Gallegos R.A., Gardner S.D., Gomez J.J., Greene G.A., Hanson A., Hartouni E.P., Hogan G.E., King N.S.P., Kwiatkowski K., Liljestrang R.P., Mariam F.G., Merrill F.E., Morgan D.V., Morley K.B., Mottershead C.T., Murray M.M., Pazuchanics P.D., Pearson J.E., Sarracino J.S., Saunders A., Scaduto J., Schach von Wittenau A.E., Soltz R.A., Sterbenz S., Thompson R.T., Vixie K., Wilke M.D., Wright D.M., Zumbro J.D.* Flash radiography with 24 GeV/c protons // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 104905. <https://doi.org/10.1063/1.3580262>
9. *Golubev A.A., Demidov V.S., Demidova E.V., Kats M.M., Kolerov S.B., Skachkov V.S., Smirnov G.N., Turtikov V.I., Fertman A.D., Sharkov B.Y.* Application of TWAC beams for diagnostics of fast processes // Atomic Energy. 2008. V. 104. P. 134—141. <https://doi.org/10.1007/S10512-008-9004-2>
10. *Antipov Yu.M., Afonin A.G., Vasilevskii A.V., Gusev I.A., Demyanchuk V.I., Zyat'kov O.V., Ignashin N.A., Karshv Yu.G., Larionov A.V., Maksimov A.V., Matyushin A.A., Minchenko A.V., Mikheev M.S., Murgorodskii V.A., Peleshko V.N., Rud'ko V.D., Terekhov V.I., Tyurin N.E., Fedotov Yu.S., Trutnev Yu.A., Burtsev V.V., Volkov A.A., Ivanin I.A., Kartanov S.A., Kuropatkin Yu.P., Mikhailov A.L., Mikhailov K.L., Oreshkov O.V., Rudnev A.V., Spirov G.M., Syrunin M.A., Tatsenko M.V., Tkachenko I.A., Khramov I.V.* A radiographic facility for the 70-GeV proton accelerator of the Institute for high energy physics // Instrum. Exp. Tech. 2010. V. 53. P. 319—326. <https://doi.org/10.1134/S0020441210030012>
11. *Varentsov D., Antonov O., Bakhmutova A., Barnes C.W., Bogdanov A., Danly C.R., Efimov S., Endres M., Fertman A., Golubev A.A., Hoffmann D.H.H., Ionita B., Kantsyrev A., Krasik Ya.E., Lang P.M., Lomonosov I., Mariam F.G., Markov N., Merrill F.E., Mintsev V.B., Nikolaev D., Panyushkin V., Rodionova M., Schanz M., Schoenberg K., Semennikov A., Shestov L., Skachkov V.S., Turtikov V., Udrea S., Vasylyev O., Weyrich K., Wilde C., Zubareva A.* Commissioning of the PRIOR proton microscope // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 023303. <https://doi.org/10.1063/1.4941685>
12. *Freeman M.S., Allison J., Andrews M., Ferm E., Goett J.J., Kwiatkowski K., Lopez J., Mariam F., Marr-Lyon N., Martinez M., Medina J., Medina P., Merrill F.E., Morris C.L., Murray M.M., Nedrow P., Neukirch L.P., Prestridge K., Rigg P., Saunders A., Schurman T., Tainter A., Trouw F., Tupa D., Tybo J., Vogan-McNeil W., Wilde C.* Inverse-collimated proton radiography for imaging thin materials // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. P. 013709. <https://doi.org/10.1063/1.4973767>
13. *Burtsev V.V., Lebedev A.I., Mikhailov A.L., Ogorodnikov V.A., Oreshkov O.V., Panov K.N., Rudnev A.V., Svirskii O.V., Syrunin M.A., Trutnev Yu.A., Khramov I.V.* Use multiframe proton radiography to investigate fast hydrodynamic processes // Combust., Explos. Shock Waves. 2011. V. 47. P. 627—638. <https://doi.org/10.1134/S0010508211060025>
14. *Sjue S.K.L., Fesseha G.M., Merrill F.E., Morris C.L., Saunders A.* High order magnetic optics for high dynamic range proton radiography at kinetic energy 800 MeV // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 015110. <https://doi.org/10.1063/1.4939822>
15. *Holtkamp D.B., Clark D.A., Ferm E.N., Gallegos R.A., Hammon D., Hemsing W.F., Hogan G.E., Holmes V.H., King N.S.P., Liljestrang R., Lopez R.P., Merrill F.E., Morris C.L., Morley K.B., Murray M.M., Pazuchanics P.D., Prestridge K.P., Quintana J.P., Saunders A., Schafer T., Shinas M.A., Stacy H.L.* A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography // AIP Conf. Proc. 2004. V. 706. P. 477—482. <https://doi.org/10.1063/1.1780281>
16. *Ferm E.N., Morris C.L., Quintana J.P., Pazuchanic P., Stacy H., Zumbro J.D., Hogan G., King N.* Proton radiography examination of unburned regions in PBX 9502 corner turning experiment // AIP Conf. Proc. 2002. V. 620. P. 966—969. <https://doi.org/10.1063/1.1483699>
17. *Neri F., Walstrom P.L.* A simple empirical forward model for combined nuclear and multiple Coulomb scattering in proton radiography of thick objects // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2005. V. 229. P. 425—435. <https://doi.org/10.1016/J.NIMB.2004.12.116>

18. Freeman M., Allison J., Espinoza C., Goett J.J., Hogan G., Hollander B., Kwiatkowski K., Lopez J., Mariam F., Martinez M., Medina J., Medina P., Merrill F., Morley D., Morris C., Murray M., Nedrow P., Saunders A., Schurman T., Sisneros T., Tainter A., Trouw F., Tupa D., Tybo J., Wilde C. 800-mev magnetic-focused ash proton radiography for high-contrast imaging of low-density biologically-relevant targets using an inverse-scatter collimator // Proc. SPIE. 2016. V. 9783. Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging. P. 97831X. <https://doi.org/10.1117/12.2216862>
19. Kantsyrev A.V., Scoblyakov A.V., Bogdanov A.V., Golubev A.A., Shilkin N.S., Yuriev D.S., Mintsev V.B. Monte-Carlo Geant4 numerical simulation of experiments at 247-MeV proton microscope // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 946. P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012019>
20. Kantsyrev A.V., Golubev A.A., Bogdanov A.V., Demidov V.S., Demidova E.V., Ladygina E.M., Markov N.V., Skachkov V.S., Smirnov G.N., Rudskoy I.V., Kuznetsov A.P., Khudomyasov A.V., Sharkov B.Yu., Dudin S.V., Kolesnikov S.A., Mintsev V.B., Nikolaev D.N., Ternovoi V.Ya., Utkin A.V., Yuriev D.S., Shilkin N.S., Fortov V.E., Turtikov V.I., Burtsev V.V., Zhernokletov M.V., Zavialov N.V., Kartanov S.A., Mikhailov A.L., Rudnev A.V., Tatsenko M.V., Varentsov D.V., Shestov L.M. TWAC-ITEP proton microscope facility // Instrum. Exp. Tech. 2014. V. 57. P. 1—10. <https://doi.org/10.1134/S0020441214010151>
21. Kantsyrev A.V., Golubev A.A., Turtikov V.I., Bogdanov A.V., Sharkov B.Y., Demidov V.S., Skachkov V.S., Markov N.V., Mintsev V.B., Fortov V.E., Kolesnikov S.A., Nikolaev D.N., Shilkin N.S., Ternovoi V.Y., Utkin A.V., Yuriev D.S., Burtsev V.V., Zavialov N.V., Mikhailov A.L., Rudnev A.V., Tatsenko M.V., Zhernokletov M.V., Kartanov S.A. ITEP proton microscopy facility // 19th IEEE Pulsed Power Conf. (PPC) 2013. IEEE. P. 1077—1081. <https://doi.org/10.1109/ppc.2013.6627498>
22. Mintsev V.B., Shilkin N.S., Ternovoi V.Ya., Nikolaev D.N., Yuriev D.S., Golubev A.A., Kantsyrev A.V., Skobliakov A.V., Bogdanov A.V., Varentsov D.V., Hoffmann D.H.H. High-explosive generators of dense low-temperature plasma for proton radiography // Contrib. Plasma Phys. 2018. V. 58. P. 93—98. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201700141>
23. Kolesnikov S., Dudin S., Lavrov V., Nikolaev D., Mintsev V., Shilkin N., Ternovoi V., Utkin A., Yakushev V., Yuriev D., Fortov V., Golubev A., Kantsyrev A., Shestov L., Smirnov G., Turtikov V., Sharkov B., Burtsev V., Zavialov N., Kartanov S., Mikhailov A., Rudnev A., Tatsenko M., Zhernokletov M. Shockwave and detonation studies at ITEP-TWAC proton radiography facility // AIP Conf. Proc. 1426. 2012. V. 390. P. 390—393. <https://doi.org/10.1063/1.3686300>
24. Schneider C., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // Nat. Methods. 2012. V. 9. P. 671—675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
25. Shilkin N.S., Mintsev V.B., Yuriev D.S., Kantsyrev A.V., Kolesnikov D.S., Bogdanov A.V., Panyushkin V.A., Scobliakov A.V., Gavrilin R.O., Golubev A.A. Spatial calibration of light yield of a proton radiography scintillator // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85. i. 10. [принято к печати] <https://doi.org/10.1134/S1063778822100568>
26. Particle Data Group, Zyla P. et al. Review of particle physics // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. P. 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
27. Varentsov D., Bogdanov A., Demidov V.S., Golubev A.A., Kantsyrev A., Lang P.M., Nikolaev D.N., Markov N., Natale F., Shestov L., Simoniello P., Smirnov G.N., Durante M. First biological images with high-energy proton microscopy // Phys. Med. A. 2012. V. 29. P. 208—213. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.03.002>