13

Алгоритмы предобработки карт поверхности для ионно-пучковой коррекции

© А.А. Дедкова,[1] А.К. Чернышев,[2] А.В. Кокошкин[3]

[1]Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Зеленоград, Москва, Россия
[2]Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия
[3]ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
141190 Фрязино, Россия
e-mail: my_name9999@mail.ru, chernyshev@ipmras.ru, shvarts65@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 5 мая 2026 г.
Принято к публикации 5 мая 2026 г.

Предложены методы предобработки карт ошибок формы поверхностей рентгенооптических элементов перед ионно-пучковой коррекцией, устраняющие локальные дифракционные артефакты, возникающие при интерферометрических измерениях. Методы включают идентификацию артефактов с помощью преобразования Хафа и восстановление образовавшихся пропусков с использованием сплайн-интерполяции или метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье. Экспериментальная проверка на данных двухзеркального объектива рентгеновского микроскопа показала, что такая предобработка исключает ложные сигналы в картах времени экспозиции ионного пучка, что позволит повысить точность ионного травления.

Ключевые слова: поверхность, рельеф, интерферометрия, измерения формы поверхности, рентгеновские зеркала, изображающие рентгеновские системы, дефект, цифровая обработка изображений, распознавание образов.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63624.149-26

Введение

Передовые технологии и фундаментальные научные исследования требуют освоения коротковолнового диапазона электромагнитного спектра — от ультрафиолета до жесткого рентгеновского излучения (0.005–100 nm). Изображающая многослойная рентгеновская оптика нормального падения, основанная на использовании высокоточных отражающих элементов, является ключевым компонентом таких современных систем, как проекционная литография в экстремальном ультрафиолете (ЭУФ) [1,2], рентгеновская астрономия для изучения процессов на Солнце и в далеком космосе [3], а также рентгеновская микроскопия в мягком рентгеновском диапазоне, открывающая возможности для изучения живых объектов с пространственным разрешением 10–20 nm [4]. Интерес к оптике этого диапазона обусловлен возможностью существенного повышения разрешения оптических систем по сравнению с видимой частью спектра. Согласно критерию Рэлея ($\delta x = 0.61 \cdot \lambda/\mathrm{NA}$) пространственное разрешение линейно зависит от длины волны используемого излучения λ [5]. Однако для достижения дифракционного предела пространственного разрешения в изображающих оптических системах, согласно критерию Марешаля [6], аберрации оптической системы (по параметру среднеквадратичного отклонения СКО) должны быть лучше $\lambda/14$. Соответственно переход в коротковолновый диапазон накладывает высокие требования на качество оптических поверхностей. Если учесть, что длина волны составляет единицы нанометров, то точность формы оптической поверхности должна быть лучше 1 nm по параметру СКО.

Основным методом улучшения характеристик оптических поверхностей до требуемой точности формы является итерационная финишная ионно-пучковая обработка (ion beam figuring, IBF) [7,8]. Эта технология, основанная на контролируемом физическом распылении материала ионным пучком, позволяет проводить коррекцию локальных ошибок формы поверхности с субнанометровой точностью. Форма оптической поверхности изменяется под действием ионной бомбардировки. Глубина ионного травления определяется дозой облучения, которая, в свою очередь, зависит от профиля распределения плотности ионного тока в пучке и от распределения времени экспозиции ионного пучка. Для проведения коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком необходимо рассчитать время нахождения ионного пучка во всех положениях над поверхностью детали, имея в качестве входных данных карту отклонения реальной формы поверхности от расчетной (пропорциональную карте аберраций) и профиль ионного пучка [9].

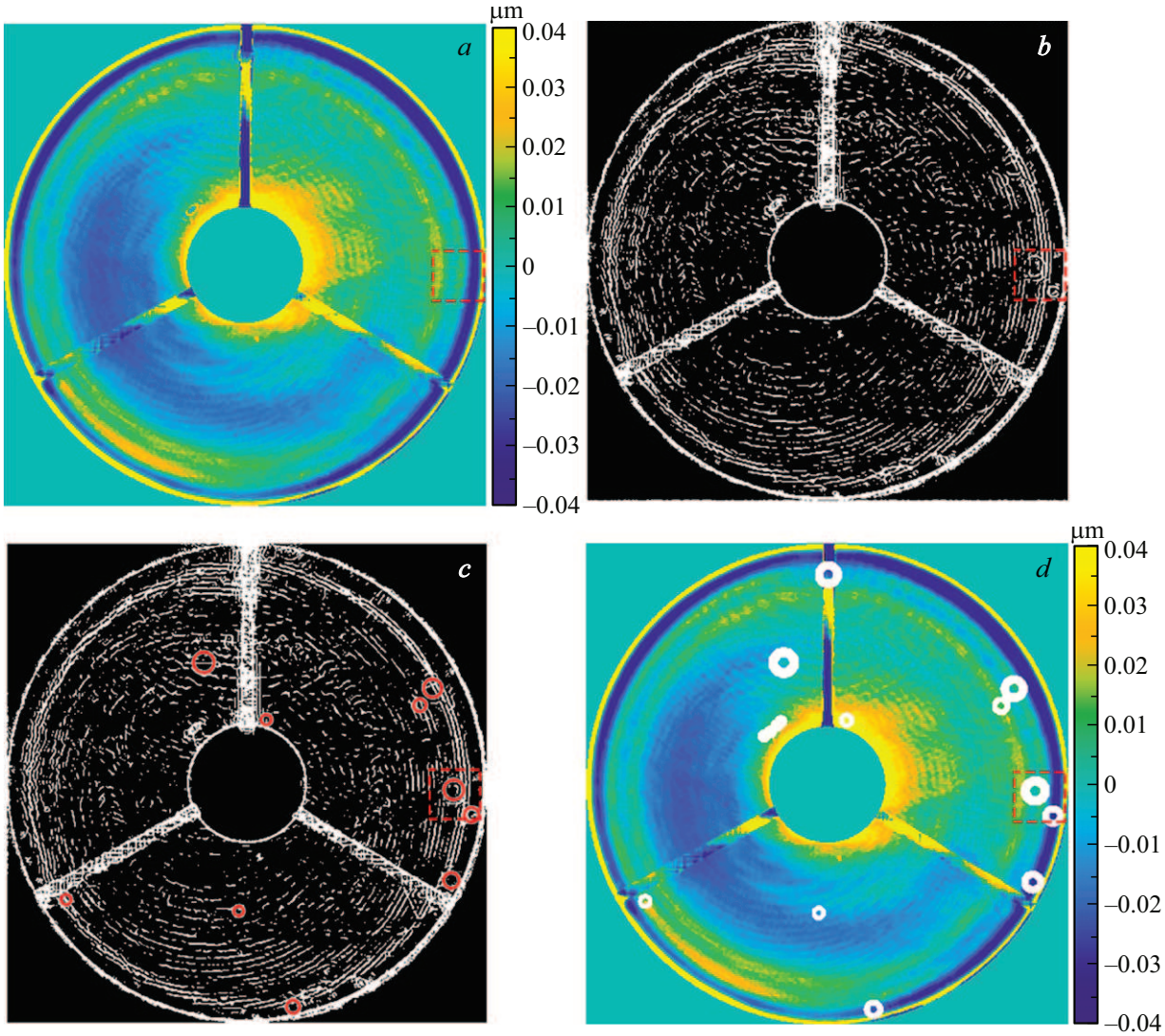

Рис. 1. Процесс удаления областей локальных дифракционных артефактов на карте ошибок формы поверхности: *a* — изначальная карта ошибок формы поверхности с локальными дифракционными артефактами; *b* — бинарный вид $K_{\max}$; *c* — визуализация обнаруженных преобразованием Хафа локальных дифракционных артефактов на бинарном изображении $K_{\max}$; *d* — карта ошибок формы поверхности с удаленными данными в области расположения локальных артефактов. Прямоугольником на всех картах показана область изображения, представленная в увеличенном виде на рис. 2.

Достижение субнанометровых погрешностей по высоте в процессе IBF требует соответствующей метрологической системы, способной надежно измерять такие малые величины. Критическим фактором для проведения IBF является достоверность исходных данных — карт ошибки формы поверхности, получаемых с помощью интерферометрии, однако на результаты измерений влияют локальные дифракционные артефакты, вызванные наличием пылинок и других микрочастиц на поверхностях оптических элементов или контрольных образцов. Из-за дифракции на точечных дефектах в карте поверхности возникают артефакты в виде концентрических колец. Данные кольца возникают в одинаковых областях при измерениях различных зеркал и объективов. На рис. 1, *a* представлена карта ошибок формы поверхности с артефактами в виде колец. В ходе реальных измерений может наблюдаться до сотни подобных артефактов. На рис. 2, *a* представлено увеличенное изображение части этой карты с более четко различимым кольцом.

Данные артефакты приводят к появлению ложных данных о рельефе поверхности, и, если не удалить эти искаженные участки из карты ошибок формы поверхности, то алгоритм расчета IBF будет учитывать их как реальные ошибки формы и пытаться корректировать „несуществующие“ дефекты. В работе [9] было показано, что эффективность обработки зависит от латерального размера обрабатываемой неоднородности. Чем меньше неоднородность, тем сложнее ее устранить. Дифракционные артефакты приводят к ошибкам

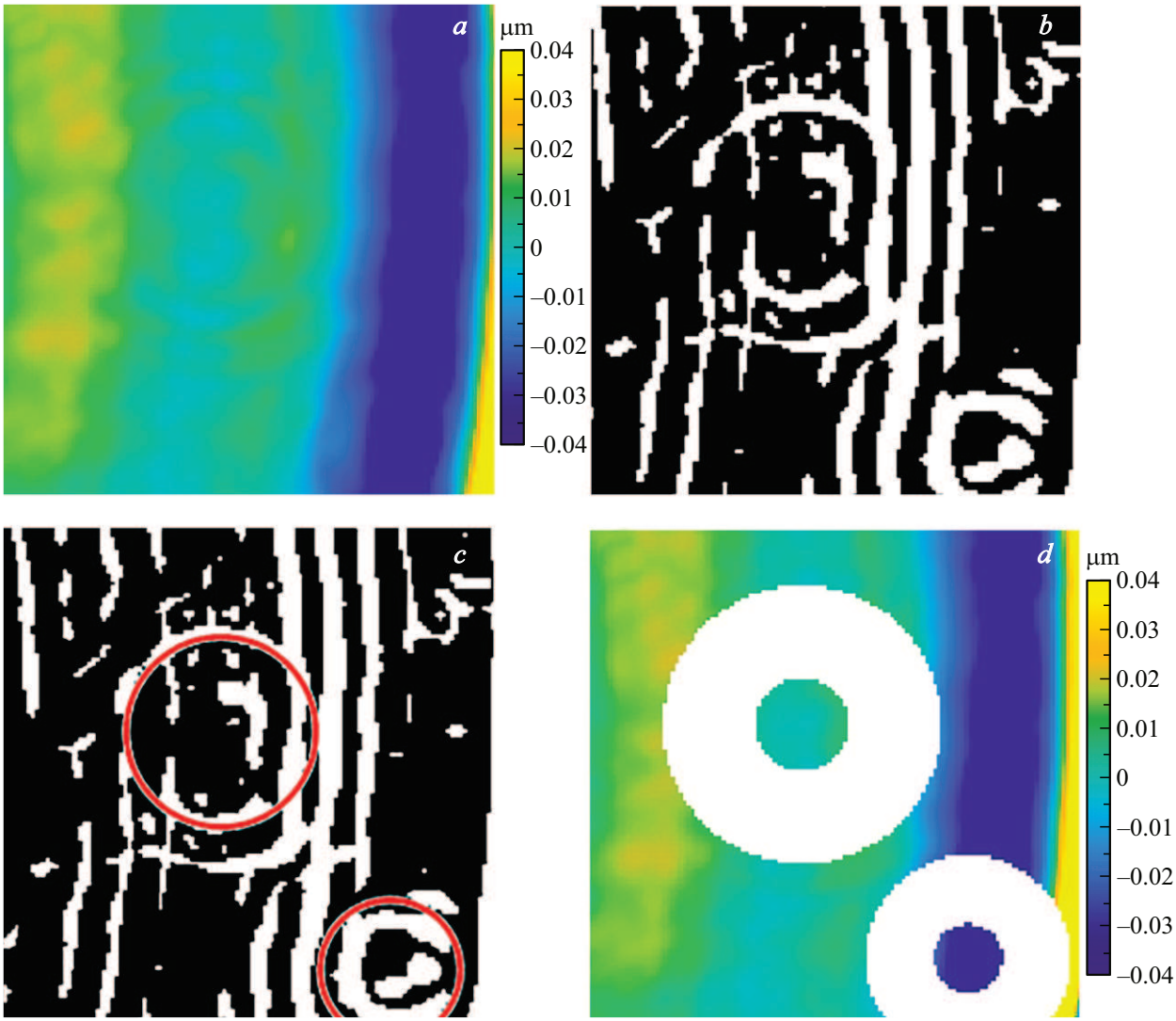

Рис. 2. Увеличенные области с рис. 1: *a* — изначальная карта ошибок формы поверхности с локальными дифракционными артефактами; *b* — бинарный вид K_{max}; *c* — визуализация обнаруженных преобразованием Хафа локальных дифракционных артефактов на бинарном изображении K_{max}; *d* — карта ошибок формы поверхности с удаленными данными в области расположения локальных артефактов.

в карте времени экспозиции, из-за чего происходит удаление материала с поверхности там, где это не требовалось. В результате на поверхности формируется реальное углубление, повторяющее форму функции удаления материала (BRF), а на следующей итерации обработки рельеф поверхности в данной области продолжает развиваться, что впоследствии ухудшит характеристики зеркала. Для борьбы с этими артефактами традиционно применяются методы фильтрации измеренных данных. Например, в работе [10] рассматривается применение различных фильтров для устранения периодических структур. Однако подобные подходы зачастую либо недостаточно эффективно подавляют артефакты, либо совместно с ними „сглаживают“ и реальные особенности рельефа поверхности. Таким образом, перед использованием карты ошибок формы поверхности для расчета времени экспозиции необходимо провести ее предобработку. Первым шагом является идентификация и удаление областей с дифракционными артефактами. После удаления фрагментов данных в этих локальных областях образуются пропуски, которые необходимо восстановить, чтобы получить цельную карту поверхности для дальнейших вычислений.

Целью настоящей работы является разработка метода предобработки карт ошибки формы поверхности рентгенооптических элементов, обеспечивающего надежное обнаружение и удаление локальных дифракционных артефактов, а также восстановление данных в области пропусков для повышения достоверности исходной информации, используемой в алгоритмах расчета ионно-пучковой коррекции формы.

1. Методы цифровой обработки изображений для устранения артефактов и восстановления данных

По своей сути карта ошибок формы поверхности представляет собой двумерный массив данных, который может быть интерпретирован как полутоновое изображение, где каждому пикселю соответствует значение высоты в данной точке. Это позволяет применять к ней методы цифровой обработки изображений, адаптируя их под специфику решаемой задачи. Для нахождения артефактов на изображениях в различных дисциплинах используются различные подходы, по большей части обусловленные конкретным видом и природой рассматриваемых артефактов [11–15]. Например, для работы с изображениями в системах видеонаблюдения среди традиционных подходов выделяют [16]: использование частотных преобразований, анализ пространственных градиентов яркости, пороговый анализ яркости, подходы на основе машинного обучения и др. Для анализа движения дождевых капель используется карта градиентов (предполагая низкое значение градиента в областях размытия на изображении), а также попиксельная нормализованная кросс-корреляция, анализ изменения интенсивности, гауссово размытие, нейронные сети [17]. В медицине для работы с томографическими изображениями используют [13] метод Хафа, преобразования Фурье, Радона, косинус-преобразования, вейвлет-преобразования с усечением высокочастотных частей спектров, бинаризацию изображений с отсечением по порогу, выравнивание гистограмм, винеровскую, медианную и ранговую фильтрации, создание маски специального фильтра (Гаусса, Лапласа, Собеля и др.), морфологические операции над бинарными изображениями и т.д., а также глубокое машинное обучение [18] и непосредственную модификацию процесса регистрации данных (аппаратной части) [14].

В настоящем исследовании для локализации областей расположения дифракционных артефактов использован метод Хафа [19]. Метод Хафа (Hough transform) — это классический алгоритм обработки изображений, используемый для выделения простых геометрических фигур на изображении, таких как прямые линии, окружности, эллипсы и т.д. Главная особенность данного алгоритма — это устойчивость к разрывам и шуму, т.е. алгоритм позволяет находить линии, даже если они частично перекрыты, прерваны или зашумлены, что важно для нашей задачи. Искомый объект представляется в виде параметрического уравнения, параметры которого образуют фазовое пространство — пространство Хафа. Более подробно о преобразовании Хафа с приведением соответствующих параметрических уравнений можно ознакомиться в работах [19–21]. В литературе описано использование преобразования Хафа для локализации объектов круглой формы в различных задачах: при контроле дисперсности частиц и их агломератов [22], оценке диаметров проволоки в пучке [23], распознавании положения деталей механизмов [21,24], идентификации положения радужки глаза [25], анализа тектонической структуры территории [20] и др. [26].

В реальной практике для устранения локальных артефактов используется несколько основных подходов: методы глубокого обучения, методы фильтрации (медианный, гауссов и др. фильтры) и морфологические операции (эрозия, дилатация и др.), интерполяционные методы. Применительно к рассматриваемой задаче обработки карт ошибок формы поверхности рентгенооптических элементов, методы глубокого обучения пока не очень эффективны из-за необходимости наличия обширной обучающей базы (создание которой затруднительно для структур рентгеновской оптики, каждая из которых является уникальным дорогостоящим изделием), а также из-за предполагаемого изменения всей карты поверхности. Методы фильтрации и морфологические методы позволяют уменьшать влияние определенных простых типов шумов, однако они видоизменяют не только область наличия артефакта, но и всю карту поверхности, что для текущей задачи недопустимо. Интерполяционные методы и методы, основанные на частотной информации, в которых производится удаление данных из области наличия артефакта с последующим заполнением этой области, выглядят наиболее эффективными в случае наличия нескольких небольших по площади областей расположения локальных артефактов.

После локализации областей дифракционных артефактов данные в этих областях, а также в их ближайшей окрестности удаляются, формируя пропуски (лакуны) для последующего восстановления. Восстановление отсутствующих фрагментов изображения — одна из классических задач цифровой обработки. Реконструкция лакун представляет собой процесс заполнения недостающих или поврежденных пикселей на основе имеющейся информации с целью создания максимально правдоподобного и визуально целостного изображения при сохранении важных деталей и минимизации артефактов.

Существует множество алгоритмов и подходов к реконструкции лакун [27–34], которые можно разделить на четыре основные категории. Первую категорию составляют методы, которые работают непосредственно с пиксельными значениями изображения, используя данные соседних пикселей для заполнения пропусков посредством интерполяции. Среди них наиболее широко применяются: линейная интерполяция, проводящая прямую линию между известными точками, бикубическая интерполяция, учитывающая 16 ближайших пикселей для более гладкого заполнения, а также сплайновая интерполяция, использующая полиномиальные функции для создания плавных кривых.

Другую категорию представляют методы, оперирующие в частотной области. Они используют преобразование Фурье и работают со спектральным представлением изображения. К ним относится, например, метод

интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье (МИПВС), который заполняет лакуны итеративно — от нулевой пространственной частоты к наивысшей, вычисляя на каждом шаге спектр неповрежденной области и восстанавливая содержимое пропусков на основе спектра исходного изображения. В отличие от многих других подходов, МИПВС не просто ретуширует область потери данных, а частично восстанавливает ее содержимое [27]. Близким по принципу является метод проекций на выпуклые множества (POCS) [28,29], который предполагает, что сигналы ограничены по времени и частоте, и позволяет получать итерационное решение [28–30]. Также в частотной области работает метод амплитудных итераций (МАИ), выполняющий итерационные вычисления по всему полю спектра в зависимости от амплитуд гармоник; он адаптирован для реконструкции разреженных двумерных сигналов, включая изображения [31].

Отдельную группу составляют методы, которые находят в неповрежденных частях изображения небольшие фрагменты (патчи), похожие на те, что должны находиться в области лакуны, и используют их для заполнения. Алгоритм нелокальных средних (Non–Local Means) усредняет пиксели, сходные с целевым, даже если они расположены далеко, что эффективно для подавления шума и восстановления небольших пропусков. Методы *image inpainting* заполняют лакуны вероятностным образом, подбирая наиболее похожие блоки из неповрежденных областей или из эталонной базы данных, что позволяет добиться естественного визуального восприятия. Такие подходы широко применяются для реставрации старых фотографий, произведений искусства и удаления нежелательных объектов, однако при значительных размерах лакун многие из них не могут обеспечить одновременно непрерывность структуры и согласованность текстур, что снижает качество результата.

Наконец, к четвертой категории относятся методы глубокого обучения, которые используют предварительно обученные модели или априорные знания о структуре объектов на изображении. Современные подходы на основе нейронных сетей, включая сверточные нейронные сети (CNN) и генеративные состязательные сети (GAN), успешно применяются для заполнения лакун в задачах реставрации искусства и обработки дистанционных данных. Тем не менее даже продвинутые модели могут допускать ошибки, например, смещать элементы изображения, и не способны воспроизвести то, что отсутствовало в обучающей выборке.

В настоящей работе ограничимся сравнением двух методов восстановления — сплайн-интерполяции и МИПВС, так как данные методы наилучшим образом соответствуют специфике обрабатываемых данных: они не требуют обучающих выборок, сохраняют частотные характеристики поверхности и обеспечивают необходимую гладкость восстановленной области.

2. Интерферометрические измерения аберраций объектива

Предложенные методики предобработки карт ошибок формы поверхности применялись при коррекции аберраций двухзеркального объектива рентгеновского микроскопа [35]. Аберрации объектива измерялись при помощи интерферометра с дифракционной волной сравнения (ИДВС) [36]. В качестве источника излучения в схеме использовался гелий-неоновый (He-Ne) лазер, работающий на длине волны 632.8 nm. Данный интерферометр создан на основе источника эталонной сферической волны — зауженного до субволновых размеров оптического волокна [37]. Эталонная сферическая волна обладает волновыми деформациями лучше 0.3 nm в числовой апертуре ($\mathrm{NA} < 0.3$), что позволяет реализовать на приборе высокоточные измерения оптических элементов и систем. На рис. 3, *a* представлена схема интерферометрического измерения.

В ходе измерения один оптоволоконный источник сферической волны *5* устанавливается в области фокуса объектива. Дополнительный оптоволоконный источник эталонной сферической волны *4* помещается вблизи другого фокуса объектива. Настройка интенсивности и поляризации источников позволяет получить интерференционную картину, содержащую информацию об аберрациях исследуемого объектива. На рис. 3, *b* представлена зарегистрированная интерферограмма, а на рис. 1, *a* — соответствующая карта аберраций.

На зарегистрированной интерферограмме (рис. 3, *b*) можно видеть артефакты как на фоне объектива, так и за его пределами, некоторые из них отмечены красными кругами.

3. Идентификация и удаление локальных дифракционных артефактов

Процесс обнаружения областей расположения локальных дифракционных артефактов на интерференционных картах ошибок форм поверхности можно разделить на три основных этапа:

1 приведение изначальной карты поверхности к виду, позволяющему четко выделить области локальных дифракционных артефактов;

2 обнаружение локальных дифракционных артефактов;

3 удаление данных из областей расположения локальных дифракционных артефактов.

На первом этапе необходимо было обработать массив данных об ошибках формы поверхности (декартовый массив координат (X, Y, Z)) так, чтобы слаборазличимые визуально „кольца“ локальных дифракционных артефактов (рис. 1, *a*, 2, *a*) стали значительно более выраженными. Для этого фактически необходимо было

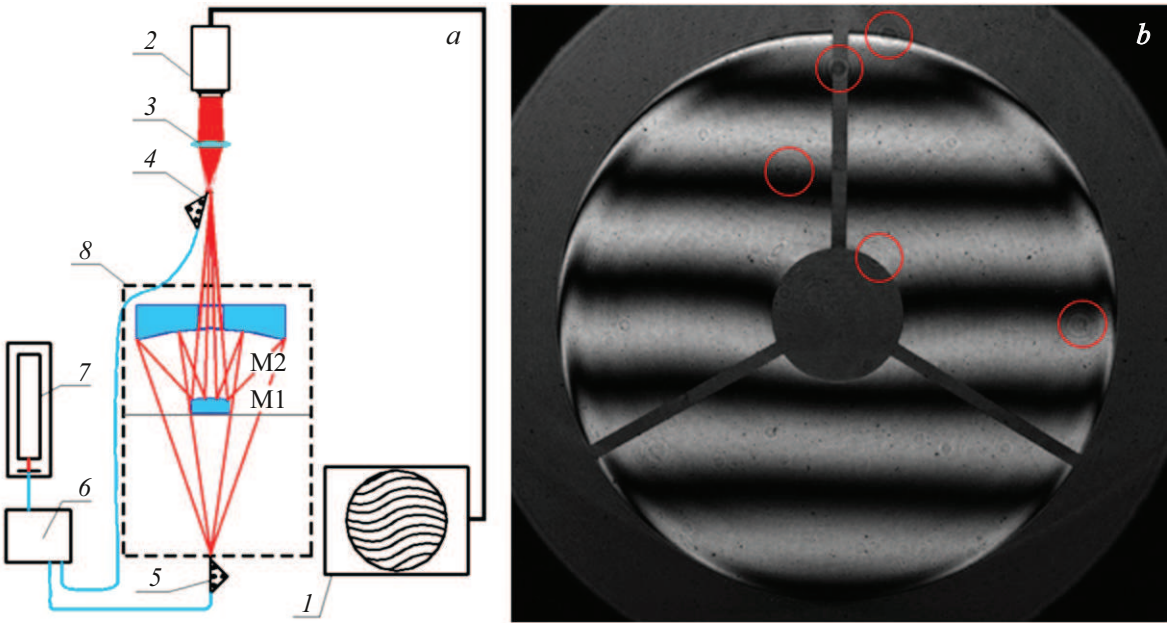

Рис. 3. Схема измерения и зарегистрированная с ее помощью интерферограмма: *a* — схема: *1* — монитор ПК с интерферограммой, *2* — ПЗС камера, *3* — объектив-наблюдательная система, строящая изображения на ПЗС камере, *4*, *5* — источники сферической волны, *6* — поляризационный контроллер+делитель пучка, *7* — лазер, *8* — исследуемый двухзеркальный объектив; *b* — реальная зарегистрированная интерферограмма (красными кругами показано расположение некоторых дифракционных артефактов).

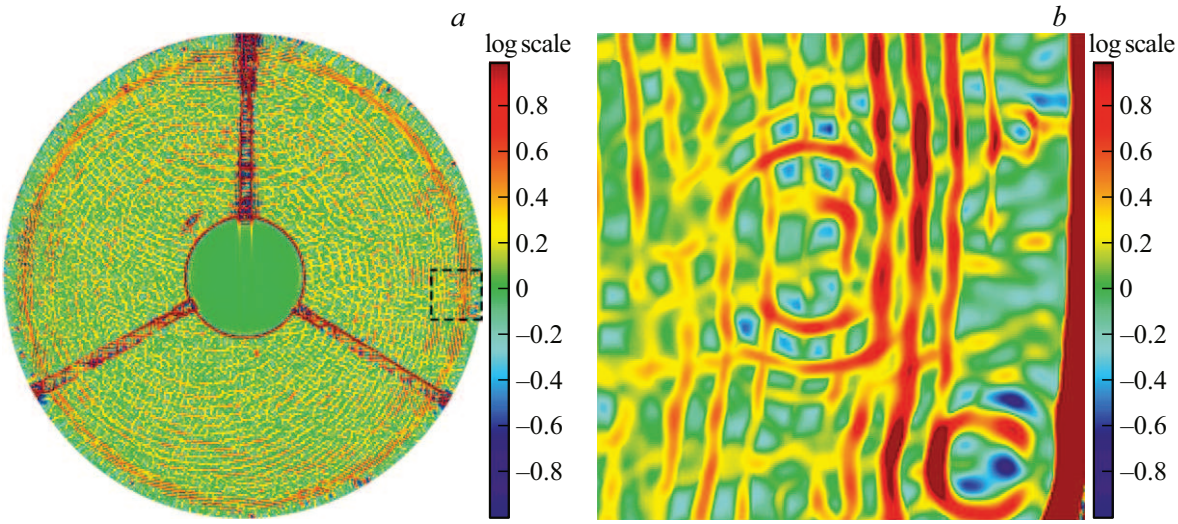

Рис. 4. Максимальная кривизна K_{max}: *a* — K_{max} для общей карты ошибок формы поверхности; *b* — K_{max} для увеличенной области изображения (показана прямоугольником на общих картах).

отделить основную форму поверхности от ее локальных небольших изменений. Как было показано ранее в [38,39], для этой цели эффективно использование морфометрических величин. По методике, описанной в работе [38], проводился расчет максимальной кривизны K_{max}, полученная карта представлена на рис. 4. Можно видеть, что достаточно слабо различимые кольца на рис. 1, *a* и 2, *a* стали существенно более выраженными (рис. 4).

Затем устанавливалось пороговое значение для K_{max}, что позволило представить карту K_{max} в бинарном виде (рис. 1, *b*).

На втором этапе к таким бинарным данным о K_{max} применялось преобразование Хафа с использованием стандартных процедур программного обеспечения [20]. Для большинства искомых объектов задавались: объект поиска — окружности радиусом от 10 до 60 пикселей, поиск более темных окружностей на более светлом

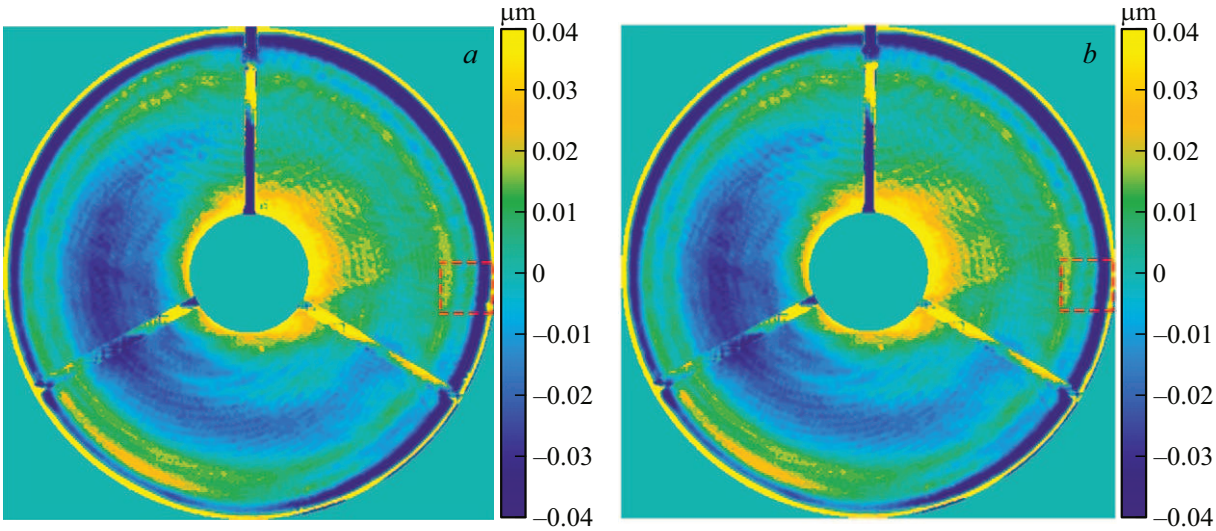

Рис. 5. Карты ошибок формы поверхности с восстановленными областями: *a* — использование МИПВС; *b* — использование сплайн-интерполяции. Прямоугольником на картах показана область изображения, представленная в увеличенном виде на рис. 6.

фоне, метод расчета „PhaseCode“ чувствительность 0.84 (для других изображений эти параметры будут отличаться; существенных преград для использования преобразования Хафа для поиска окружностей другого размера или количества нет). На выходе был получен массив данных о координатах центров и радиусах найденных окружностей. На рис. 1, *c* показано наложение найденных окружностей (показаны красным) на бинарную карту $K_{\max}$.

На третьем этапе из начального массива данных об ошибках формы поверхности удалялись кольцевые области в местах расположения найденных окружностей. Метод реализован через использование расстояния Минковского [40] (для этой цели может быть использована и другая подходящая для декартовой системы координат метрика расстояний). Для каждого из центров найденных окружностей определялись сведения о ближайших „соседях“ (наиболее близко расположенных элементах — пикселях данных): номера этих „соседей“ и расстояние от них до центра окружности. Затем из этого общего массива сведений о „соседях“ выбирались только те, что находятся на определенном расстоянии от центра окружности (в текущем случае — от половины ее радиуса до полутора радиусов) и соответствующим элементам массива присваивалось значение *NaN* (Not-A-Number). Такой подход позволил сформировать окружности с отсутствующими данными в областях расположения локальных дифракционных артефактов круглой формы.

Сформированная карта данных без локальных дифракционных артефактов показана на рис. 1, *d*. Области удаленных данных заданы прозрачным (на рис. 1, *d* отображены белым цветом), что позволяет при отображении карт в формате 3*D* видеть сквозь эти данные.

4. Восстановление данных в области локальных дифракционных артефактов

В настоящей работе ставилась задача восстановления поврежденного изображения, с учетом того, что единственным источником информации является сохранившаяся часть этого изображения. Для реконструкции данных использовалось два подхода.

Первый — МИПВС Фурье [27,30], который эффективно восстанавливает отсутствующие фрагменты. Преимущество МИПВС состоит в его универсальности — он работает с любыми формами повреждений и показывает хорошие результаты даже при значительных потерях. Методика не требует предварительных знаний об исходном изображении, а опирается исключительно на сведения о спектре исследуемого объекта. Заполнение отсутствующих частей изображения делается итерационно (от нулевой пространственной частоты до наивысшей пространственной частоты). Результат работы МИПВС показан на рис. 5, *a*.

В качестве альтернативного подхода проводилось заполнение пропусков (лакун) с помощью сплайн-интерполяции, как описано в [32,33]. Этот метод основан на моделировании поведения изогнутой упругой пластинки: он решает систему линейных уравнений для заданных опорных точек, создавая двумерную сплайн-поверхность. Важно отметить, что при расчете сплайна можно учитывать область вокруг лакуны шири-

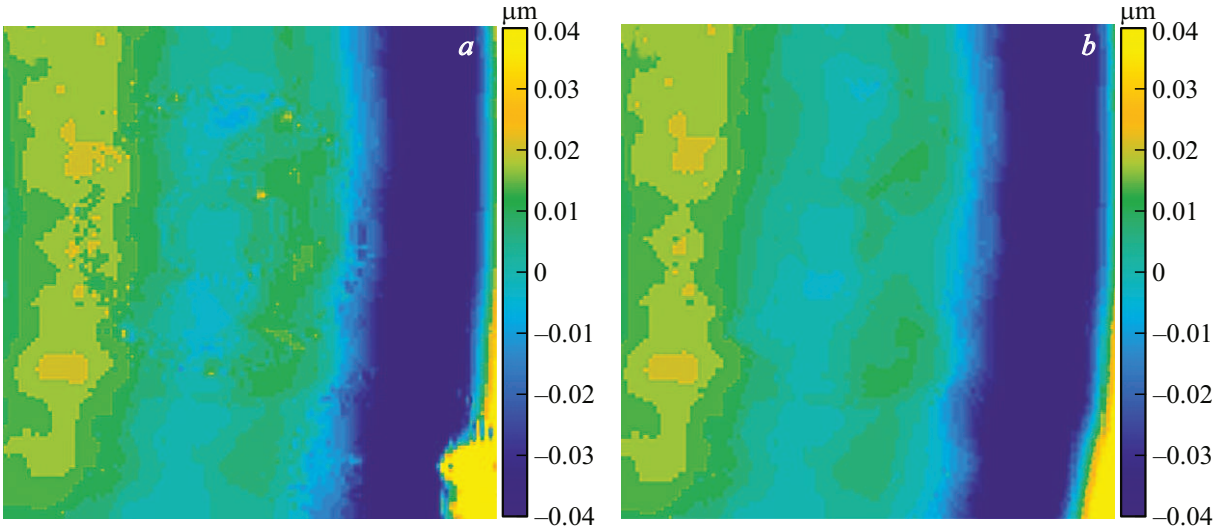

Рис. 6. Увеличенные области с рис. 5: *a* — использование МИПВС; *b* — использование сплайн-интерполяции.

ной в несколько пикселей. Результат работы сплайн-интерполяции показан на рис. 5, *b*.

Несмотря на визуальное отсутствие различий (рис. 5) в результатах обработки методами сплайн-интерполяции и МИПВС, качественно они дают отличающиеся результаты, что продемонстрировано на рис. 6. На изображении уменьшенного качества (рис. 6) видно, что сплайн чрезмерно сглаживает данные, однако лучше удаляет кольца. В зависимости от конкретной задачи определяется более подходящий подход.

5. Вычисление времени экспозиции ионного источника

Далее полученные карты использовались для расчета времени экспозиции. Входными данными для расчета служат восстановленная карта ошибки формы поверхности $S(x, y)$ после удаления дифракционных артефактов и заполнения пропусков и функция скорости ионного травления $BRF(x, y)$, определяющая распределение скорости ионного травления при неподвижном пучке. Стандартная методика определения функции $BRF(x, y)$ предполагает создание тестового кратера на поверхности образца с последующей аппроксимацией его профиля двумерной аналитической функцией, где амплитуда функции нормируется на время экспозиции, что позволяет количественно оценить скорость удаления материала. Основной подход к расчету времени экспозиции основан на том, что глубина ионной обработки $R(x, y)$ может быть представлена как свертка функции удаления материала и времени экспозиции $t(x, y)$: $R(x, y) = BRF(x, y) \otimes t(x, y)$.

Для коррекции измеренного профиля поверхности $S(x, y)$ необходимо, чтобы глубина ионной обработки соответствовала этому профилю ($S(x, y) = R(x, y)$). Таким образом, проблема сводится к решению обратной задачи — деконволюции между восстановленной картой ошибок S и функцией удаления материала BRF.

Для решения обратной задачи использовался итерационный метод градиентного спуска с ограничением на неотрицательность времени экспозиции $t(x, y) \geq 0$ и возможностью задания максимального суммарного времени обработки [9].

Данный подход позволяет рассчитать оптимальное распределение времени экспозиции, обеспечивающее минимизацию среднеквадратичного отклонения (СКО) финальной поверхности при заданных ограничениях. При этом качество восстановления карты ошибок на этапе предобработки напрямую влияет на точность расчета времен: пропуски или искажения в исходных данных могут приводить к ложным сигналам в карте времени и, как следствие, к неоправданному травлению поверхности.

Результатом расчета является карта времени экспозиции $t(x, y)$, которая в дальнейшем может быть использована для управления ионным источником в процессе финишной коррекции формы оптической поверхности.

Для оценки эффективности предложенных алгоритмов предобработки карт ошибок формы поверхности были проведены расчеты времени экспозиции ионного источника с использованием трех вариантов входных данных: исходная карта ошибок, содержащая дифракционные артефакты; карта ошибок после восстановления пропусков методом сплайн-интерполяции; карта ошибок после восстановления пропусков методом МИПВС. Функция $\mathrm{BRF}(x, y)$ задавалась нормальным распределением с шириной на полувысоте 2.2 mm, что соответствует используемым на практике ионным пучкам. На рис. 7 представлены полученные карты времени экспозиции $t(x, y)$, рассчитанные для каждого из трех случаев.

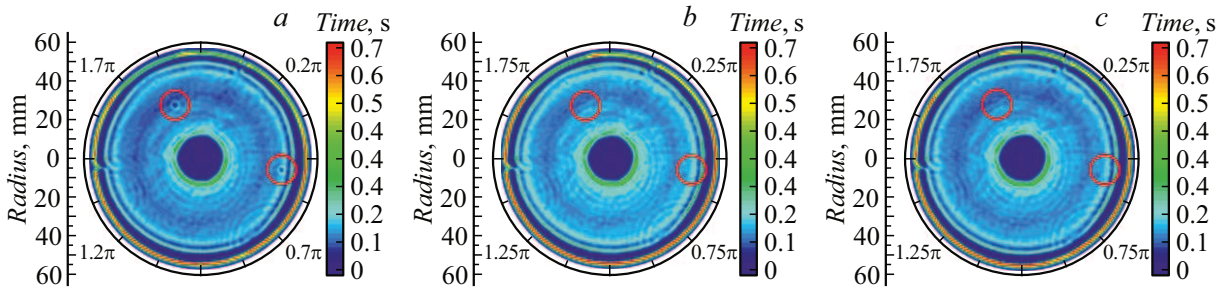

Рис. 7. Карты времени экспозиции ионного пучка: *a* — для вычисления использовалась исходная карта; *b* — использовалась карта, восстановленная методом МИПВС; *c* — использовалась карта, восстановленная методом сплайн-интерполяции.

Анализ полученных карт времени экспозиции позволяет сделать следующие наблюдения. При использовании исходной карты ошибок (рис. 7, *a*) в областях, соответствующих дифракционным артефактам, наблюдаются локальные неоднородности карты времени экспозиции. При использовании карт ошибок, прошедших предобработку (рис. 7, *b*, *c*), локальные неоднородности в зонах бывших артефактов отсутствуют. Оба метода восстановления — как сплайн-интерполяция, так и МИПВС — позволяют устранить ложные сигналы в карте времени экспозиции, обеспечивая более равномерное распределение времени травления в этих областях.

Качественное сравнение результатов показывает, что оба метода успешно устраняют артефакты, связанные с дифракционными кольцами. Карты времени экспозиции ионного пучка, полученные после предобработки, лишены локальных выбросов, характерных для расчета по исходным данным. В свою очередь, метод сплайн-интерполяции является более простым в реализации и содержится во многих программных пакетах. Метод МИПВС будет более эффективен при необходимости работы с большим количеством отсутствующих данных.

Заключение

В работе рассмотрена проблема влияния дифракционных артефактов, возникающих при интерферометрических измерениях формы рентгенооптических поверхностей, на процесс расчета времени экспозиции для ионно-пучковой коррекции. Показано, что наличие таких артефактов приводит к формированию ложных сигналов в карте времени травления, что может вызывать неоправданное удаление материала и ухудшение характеристик оптических элементов.

Для решения этой задачи предложен метод предобработки карты ошибок формы поверхности, включающий два этапа. На первом этапе производится идентификация и удаление областей дифракционных артефактов с использованием преобразования Хафа, адаптированного для поиска концентрических колец на картах высот. На втором этапе происходит восстановление данных в области пропусков с помощью двух альтернативных подходов — сплайн-интерполяции и МИПВС.

Экспериментальная проверка метода проведена на данных, полученных при интерферометрических измерениях двухзеркального объектива рентгеновского микроскопа. Сравнительный анализ карт времени экспозиции, рассчитанных по исходной и модифицированным картам ошибок формы поверхности, показал, что использование исходной карты приводит к появлению локальных неоднородностей времени травления в областях расположения артефактов, в то время как оба метода восстановления (сплайн-интерполяция и МИПВС) позволяют эффективно устранить эти ложные сигналы. Предобработка карты ошибок формы поверхности перед ионным травлением обеспечивает более равномерное и физически обоснованное распределение времени экспозиции.

Таким образом, предложенный метод предобработки карт ошибок формы поверхности позволяет повысить достоверность исходных данных, используемых в алгоритмах расчета ионно-пучковой коррекции, что способствует улучшению качества финишной обработки рентгенооптических элементов. Представленные подходы могут найти свое применение при изготовлении прецизионной оптики для коротковолнового диапазона.

Финансирование работы

Разработка модели выделения областей на основе преобразования Хафа выполнена в рамках финансовой поддержки Минобрнауки в рамках государственного проекта FSMR-2025-0005. Проведение измерений характеристик объектива выполнено в рамках Государственного задания FFUF-2024-0022. Исследование и применение методов заполнения пропущенных областей выполнено в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] H.J. Levinson. Jpn. J. Appl. Phys., **61 (SD)**, SD0803 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/ac49fa

[2] E.V. Setten, G. Bottiglieri, J. McNamara, J.V. Schoot, K. Troost, J. Zekry, T. Fliervoet, S. Hsu, J. Zimmermann, M. Roesch, B. Bilski, P. Graeupner. Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography X. SPIE, **10957**, 9 (2019). DOI: 10.1117/12.2514952

[3] C. Hoffman, T.G. Giallorenzi, L.B. Slater. Appl. Optics, **54** (31), F268 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.00F268

[4] И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 3 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819010128

[5] M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, 7-th ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 1999), ch. 8.6.2, p. 461.

[6] M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, ed. by M. Born, E. Wolf. 7th ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 1999), ch. 9.3, p. 528.

[7] T. Wang, L. Huang, M. Vescovi, D. Kuhne, Y. Zhu, V. Negi, Z. Zhang, C. Wang, X. Ke, H. Choi, W.C. Pullen, D. Kim, Q. Kemao, K. Nakhoda, N. Bouet, M. Idir. Opt. Express, **29** (23), 38737 (2021). DOI: 10.1364/OE.443346

[8] E. Miao, G. Wang, S. Gao, Y. Sui, H. Yang. In Intern. Conf. Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2015). SPIE, **9524**, 768 (2015). DOI: 10.1117/12.2187648

[9] A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo, I.V. Malyshev, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, R.S. Pleshkov, R.V. Smertin, M.V. Svechnikov, M.N. Toropov. Precision Eng., **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006

[10] E.V. Petrakov, N.I. Chkhalo, A.K. Chernyshev, E.I. Glushkov. Opt. Eng., **63** (11), 114104 (2024). DOI: 10.1117/1.OE.63.11.114104

[11] Е.А. Аминова, И.Н. Трапезников. REDS: Телекоммуникационные устройства и системы, **7** (3), 280 (2017).

[12] Я.В. Савицкий, С.В. Галкин. Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации, **1**, 130 (2021).

[13] Д.Д. Захаров, В.С. Сизиков, В.В. Шемплинер, Д.С. Щекотин. Научно-технический вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та информационных технологий, механики и оптики, **32**, 138 (2006).

[14] А.А. Долгалев, А.Б. Данаев, Ш.Д. Хоссаин, А.А. Куликова, Н.Ф. Ямуркова, Д.В. Буренчев, А.А. Чагаров. Медицинский алфавит, **38**, 14 (2021). DOI: 10.33667/2078-5631-2021-38-14-20

[15] В.Г. Копотилова, А.В. Пирус, А.И. Крылова. В сб.: *Молодежь и научно-технический прогресс: материалы региональной научно-практической конференции*. (2021), с. 305.

[16] Р.Н. Минниханов, Т.Р. Баторшин, Р.М. Габбазов, Р.И. Фахразиев, А.С. Катасев. Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии, **3**, 110 (2025). DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2025/3/110-122

[17] В.В. Бурдина, О.С. Шипитько. Сенсорные системы, **35** (2), 153 (2021). DOI: 10.31857/S0235009221020049

[18] А. Самойленко, А. Пимкин, Н. Антипина, А. Овечкина, А. Далечина, М. Беляев. В сб.: *Информационные технологии и системы 2019* (ИТиС 2019). Сборник трудов 43-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН. (2019), с. 439.

[19] R.C. Gonzalez, R.E. Woods. *Digital image processing*, 3rd ed. (Pearson Prentice Hall, NJ, 2008)

[20] Ю.Л. Ребецкий, Р.С. Алексеев. Геодинамика и тектонофизика, **5** (1), 257 (2014).

[21] В.Л. Самсонов. Тр. Ростовского гос. ун-та путей сообщения, **2**, 51 (2016).

[22] P.V. Gulyaev. Devices and Methods of Measurements, **14** (3), 199 (2023). DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-199-206

[23] А.Л. Гончаров, И.С. Чулков, А.В. Нехорошев, Х.М. Козырев. Вестник Пермского нац. исследовательского политех. ун-та. Машиностроение, материаловедение, **25** (2), 59 (2023). DOI: 10.15593/2224-9877/2023.2.07

[24] С.Ф. Яцун, А.В. Мальчиков, О.Б. Кочергин. Известия Юго-Западного гос. ун-та, **26** (3), 8 (2022). DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-8-20

[25] В.А. Частикова, С.А. Жерлицын, А.В. Беспалов. Электронный сетевой политематический журнал „Научные труды КубГТУ“, **1**, 88 (2024). DOI: 10.26297/2312-9409.2024.1.10

[26] А.П. Кирпичников, С.А. Ляшева, А.А. Шакирзянова, М.П. Шлеймович, Р.М. Шакирзянов. Вестник Технологического ун-та, **22** (8), 164 (2019).

[27] А.В. Кокошкин, В.А. Коротков, К.В. Коротков, Е.П. Новичихин. Компьютерная оптика, **43** (6), 1030 (2019). DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1030-1040

[28] Л.М. Брэгман. ДАН СССР, **162** (3), 487 (1965).

[29] L.G. Gubin, B.T. Polyak, E.V. Raik. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, **7** (6), (1967). DOI: 10.1016/0041-5553(67)90113-9

[30] А.В. Кокошкин, В.А. Коротков, Е.П. Новичихин. Радиотехника и электроника, **65** (12), 1181 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420120104

[31] А.В. Кокошкин. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], **9** (2022). DOI: 10.30898/1684-1719.2022.9.7

[32] А.В. Ашкеназы. *Сплайн-поверхности. Основы теории и вычислительные алгоритмы* (Изд-во Тверского гос. ун-та, Тверь, 2003).

[33] Е.А. Нестеренко. Записки Горного ин-та, **204**, 127 (2013).

[34] D. Lokhande, R.G. Zope, V. Bendre. IJCSN Intern. J. Computer Sci. Network, **3** (1), 1100 (2014).

[35] I.V. Malyshev, D.G. Reunov, A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo, M.N. Toropov, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, R.S. Pleshkov, Ya.O. Shabelski, V.N. Polkovnikov. Opt. Express, **30** (26), 47567 (2022). DOI: 10.1364/OE.475032

[36] P.P. Naulleau, K.A. Goldberg, S.H. Lee, C. Chang, D. Attwood, J. Bokor. Appl. Opt., **38** (35), 7252 (1999). DOI: 10.1364/AO.38.007252

[37] N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. Rev. Sci. Instrum., **79**, 033107 (2008). DOI: 10.1063/1.2900561

[38] А.А. Дедкова, И.В. Флоринский, А.К. Чернышев. ЖТФ, **93** (7), 1059 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55770.89-23 [A.A. Dedkova, I.V. Florinsky, A.K. Chernyshev. Tech. Phys., **68** (7), 988 (2023). DOI: 10.61011/TP.2023.07.56651.89-23]

[39] А.А. Дедкова, И.В. Флоринский, Е.Э. Гусев, Н.А. Дюжев, М.Ю. Фомичев, М.Ю. Штерн. Дефектоскопия, **11**, 41 (2021). DOI: 10.31857/S0130308221110051 [A.A. Dedkova, E.E. Gusev, N.A. Dyuzhev, M.Y. Fomichev, M.Y. Shtern, I.V. Florinsky. Russ. J. Nondestructive Testing, **57** (11), 1000 (2021). DOI: 10.1134/S1061830921110073]

[40] И.Н. Мощенко. Инженерный вестник Дона, **3**, 77 (2015).