

УДК 53.088.7

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ УДАЛЕНИЯ ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИИ, ПОЛУЧЕННОМ В ЗЕРКАЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 13.84 нм

© 2022 г. Д. Г. Реунов^а, *, И. В. Малышев^а, Н. И. Чхало^а

^аИнститут физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: reunov_dima@ipmras.ru

Поступила в редакцию 24.04.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 30.06.2022 г.

В настоящей работе осуществлен подбор оптимального метода фильтрации и вариации его параметров для улучшения качества изображения без потери полезного сигнала. Предложена новая методика фильтрации изображений для удаления шумов, которая не приводит к размытию изображений. Появление шумов связано с нагревом регистрирующей системы зеркального “мягкого” рентгеновского микроскопа. На данный момент существует обширное количество методов и алгоритмов для удаления шума с изображения. Однако в большинстве своем методы размывают исходное изображение вследствие фильтрации согласно ядру фильтра. Это размытие приводит к ухудшению разрешения или вообще к потере части полезной информации, которая может играть важную роль при обработке экспериментальных изображений. Предложен комбинированный метод фильтрации изображения, который включает в себя пороговый фильтр и медианный. Эта комбинация позволяет найти локальные скачки или провалы сигнала (диапазон которых задан вручную), которые в дальнейшем будут заменены на медианные значения окрестности точки на изображении. В результате чего, медианный фильтр применен не на все изображение, а только там, где есть резкие перепады интенсивности, поэтому не размывает изображение как целое.

Ключевые слова: “мягкая” рентгеновская микроскопия, аксиальная томография, удаление шума, фильтрация изображений, трехмерная реконструкция изображения.

DOI: 10.31857/S1028096022120238

ВВЕДЕНИЕ

При получении изображения любыми методами всегда регистрируют шумы, которые связаны с тем или иным физическим принципом оптической системы или системы регистрации изображения. Поэтому проблема шумоподавления является актуальной. Существует обширное количество алгоритмов [1–11], которые работают с тем или иным видом шума на изображениях и реализует определенный вид фильтрации, поскольку идеального многозадачного фильтра не существует.

В настоящей работе осуществлен подбор оптимального и универсального метода фильтрации и вариации его параметров для улучшения качества изображения без потери полезного сигнала. Шумы усиливаются при деконволюционной реконструкции изображения, поэтому так важно от них избавиться заранее. Работа фильтра рассмотрена на примере изображения окна размером 10×10 мкм в пластине кремния, полученного на рентгеновском микроскопе с использованием излучения с длиной волны 13.84 нм.

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ШУМОВ И МЕТОДЫ ИХ УДАЛЕНИЯ

Оптическая схема микроскопа описана в работе [12]. Основная причина возникновения шумов в рассмотренном в настоящей работе случае – это нагрев камеры при долгой съемке так называемого z -стэка образца, что составляет порядка 20–40 мин (в зависимости от времени экспозиции одного кадра). Z -стэком называют набор изображений, снятых при перемещении образца относительно фокальной плоскости объектива вдоль оптической оси микроскопа.

При нагреве платы камеры в процессе ее работы тепло передается на саму матрицу, что вызывает тепловые шумы. Шумы проявляются как статистический шум типа “соль и перец” (белые и черные пиксели на изображении) в сочетании со случайными шумами самой матрицы. Шумы становятся заметны через 15 мин работы камеры, когда она нагревается до 37°C .

Простейший прямоугольный сглаживающий фильтр радиуса r можно задать при помощи мат-

рицы размера $n \times n$, где количество элементов равно $(2r + 1)^2$, все значения элементов которой равны $\frac{1}{(2r + 1)^2}$, а сумма значений равна единице.

При фильтрации с таким ядром значение интенсивности пикселя заменяется усредненным значением пикселей в квадрате. Чем больше окно фильтрации, тем меньше будет усредненная интенсивность шума, но будет происходить размытие деталей изображения.

Несколько меньшее размытие изображения при той же эффективности шумоподавления получается при модификации фильтра с увеличением веса центральной точки. К примеру, Гауссов фильтр с ненулевым ядром: $h(i, j) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right)$ [15]. Значения ядра фильтра быстро убывает к нулю при удалении от центра, и можно ограничиться сверткой с ядром небольшого размера, так как чем меньше размер ядра ($n \times n$), тем меньше размытие изображения. Гауссова фильтрация также сглаживает изображение. Степень размытия изображений определяется параметром σ (дисперсии распределения).

При медианной фильтрации [16] результатом является медианное значение пикселей окрестности $I(x, y)$, форма которой определяется ядром фильтра $M(x, y)$. Такой фильтр можно описать в виде $B(x, y) = \text{med}\{M(x, y)\}$. То есть, ядром фильтра сканируется массив пикселей и центральное значение ядра равно медианному значению его окрестности, заданного размером ядра. Медианная фильтрация способна эффективно удалять из изображения помехи, независимо воздействующие на отдельные пиксели. Но так же происходит сглаживание изображения. Фильтр “среднего” аналогичен медианному, только значение пикселя выбирается как среднее в его окрестности.

Предложенный нами фильтр является комбинацией других фильтров: порогового и медианного. Работает он следующим образом: сначала создают копию $K(x, y)$ исходного изображения $I(x, y)$, к которой применяют стандартный медианный фильтр (т.е. копия становится “размытой”). Далее каждый элемент исходного изображения $I(x, y)$ рассматривают последовательно и сравнивают значение текущего пикселя с соседними, и если разница по модулю превышает пороговое значение Δ , заданное вручную, то значение исходного пикселя, заменяется на значение из “размытой” копии исходного изображения. Таким образом, не происходит размытия всего изображения, а только локальное изменение одного пикселя там, где обнаружен резкий всплеск или падение в интенсивности сигнала.

$$\text{Result} = \begin{cases} I(x, y), & |I(x + 1, y) - I(x, y)| < \Delta \\ K(x, y) = \text{med}\{M(x, y)\}, & \\ |I(x + 1, y) - I(x, y)| > \Delta. & \end{cases} \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изображения для обработки были получены на зеркальном рентгеновском микроскопе с использованием излучения с длиной волны 13.84 нм [13, 14]. В качестве объекта исследования было выбрано окно размером 10×10 мкм в пластине из кремния и был отснят z -стэк. Это необходимо для того, что бы произвести трехмерную деконволюцию полученного изображения с экспериментальной функцией рассеяния точки (ФРТ), которая искажает изображение в основном из-за того, что на изображение фокусного среза влияют и внефокусные срезы. Механизм построения изображения абсорбционный, т.е. интенсивность лучей падает не только из-за их поглощения материей в фокальном срезе, но и во всей толще образца, как до, так и после фокального среза [14].

Размер изображения составляет 2048×2048 пикселей, возьмем часть изображения 186×199 пикселей для уменьшения времени деконволюции. Для начала возьмем самое четкое изображение из середины z -стэка и применим ряд фильтров (Гауссова фильтрация, фильтр среднего значения, медианный фильтр и комбинированный метод) к нему с одинаковым размером ядра 3×3 . Результат представлен на рис. 1.

Как видно из рис. 1, при применении вышеперечисленных фильтров происходит размытие изображения, за исключением комбинированного фильтра. Так же стоит отметить, что медианный фильтр удалил все резкие перепады интенсивности.

Для количественного анализа приведем пиковое соотношение сигнал/шум $PSNR$. Пиковое соотношение сигнал/шум выбрано из-за того, что на исходном изображении есть шумы, но их количество небольшое относительно фонового сигнала и если считать простое соотношение сигнал/шум, то оно одинаково для всех методов фильтрации. Определим отношение амплитуд сигнала и шума, которое рассчитывали по формулам (2)–(3). Для этого необходимо выделить область, где одновременно присутствует сигнал от окна в пластине кремния и где его нет. Эту область определяли вручную и использовали как маску для последующего разделения области изображения на сигнал и фон:

$$\sigma_{\text{сигнал, шум}} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \left(I_{i,j} - \frac{\sum_{i,j} I_{i,j}}{N} \right)^2, \quad (2)$$

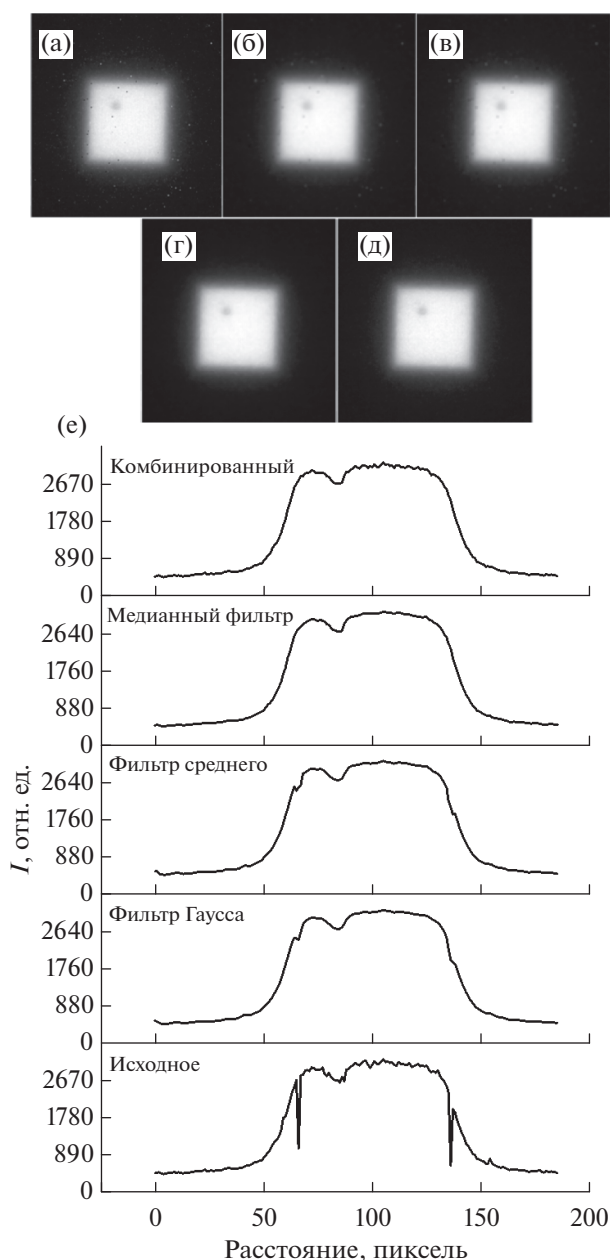


Рис. 1. Результат применения различных фильтров для удаления шумов на экспериментальном изображении окна размером 10×10 мкм в пластине из кремния до деконволюционной реконструкции: а – исходное изображение; б – Гауссов фильтр; в – фильтр среднего значения; г – медианный фильтр; д – комбинированный фильтр. На графиках (е) представлено произвольное сечение.

$$PSNR = 20 \lg_{10} \left(\frac{|I_{\max \text{ сигнала}} - I_{\max \text{ шума}}|}{\sqrt{\sigma_{\text{шума}}^2 + \sigma_{\text{сигнала}}^2}} \right). \quad (3)$$

Величина $PSNR$ уменьшается при увеличении номера изображения в z -стэке, что соответствует нагреву камеры при продолжительной работе,

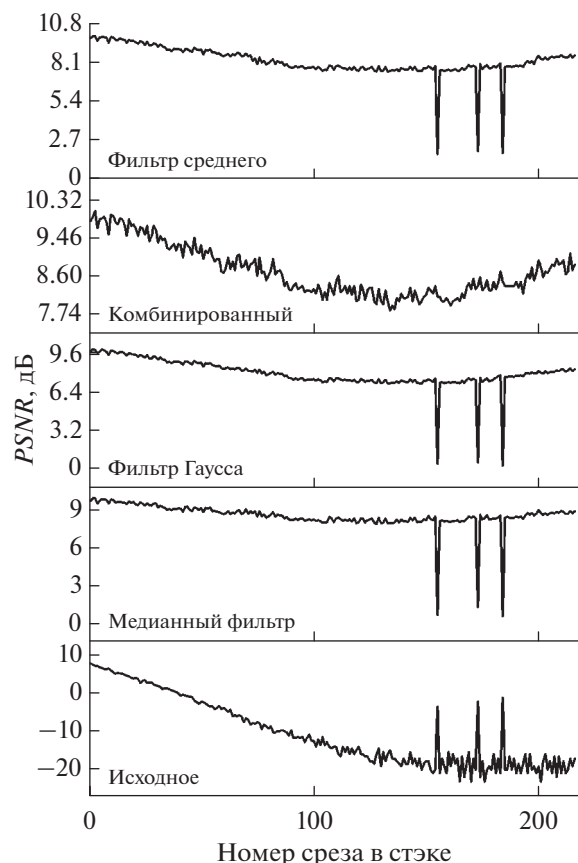


Рис. 2. Зависимость $PSNR$ от номера изображения в стэке для различных типов фильтрации.

рис. 2. Время съемки всего z -стэка из 220 изображений составило около 40 мин. При применении различных методов фильтрации уровень $PSNR$ практически одинаков для всего z -стэка изображения. Единственное отличие – это отсутствие резкого падения $PSNR$ практически до нуля на некоторых изображениях для всех методов за исключением фильтра, предложенного в настоящей работе.

Далее проводили процедуру деконволюции z -стэка изображений для каждого типа фильтрации. Деконволюцию выполняли по методу Ричардсона–Люси [17, 18] в программном пакете DeconvolutionLab2 [19] в программе ImageJ [20]. Так как изображение объемное и ФРТ тоже объемная, то для каждого среза учитывали информацию соседних срезов, важно чтобы функция $PSNR$ не имела никаких особенностей на протяжении всего z -стэка, иначе это исказит результат. На рис. 3 приведены изображения после деконволюции.

Как видно из рис. 3, если не делать фильтрацию изображения, то после деконволюции происходит значительное усиление шумов. Анало-

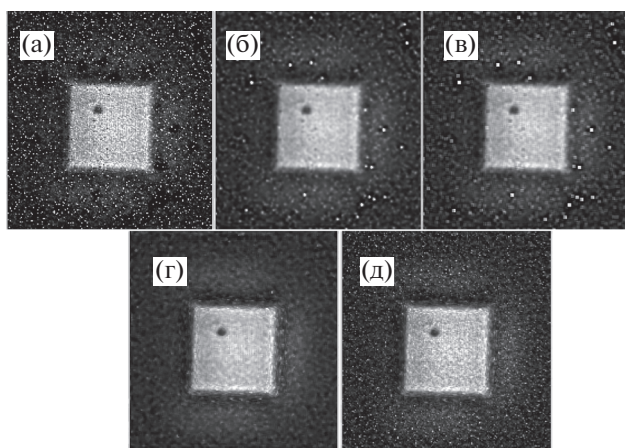


Рис. 3. Изображения после деконволюции с предварительной фильтрацией шумов: а – исходное изображение; б – Гауссов фильтр; в – фильтр среднего значения; г – медианный фильтр; д – комбинированный фильтр.

гично для фильтра Гаусса и “среднего”. При деконволюции изображения, полученного после применения медианного и предложенного в настоящей работе фильтра, уровень шумов становится меньше, но медианный фильтр впоследствии размыл изображение, согласно ядру фильтра.

Увеличение шумов после деконволюции происходит по следующей причине. Процедура деконволюции обратна свертке. Представим одиночный пиксель на изображении, возьмем ФРТ в виде двойного конуса вдоль оптической оси (направления z -стэка) и произведем свертку с одиночным пикселем. В результате произойдет его размытие интенсивности по всем трем координатам согласно ФРТ. Когда проводят деконволюцию, то для конкретного пикселя учитывают, согласно ФРТ, всю информацию (полезный сигнал) по трем координатам. Таким образом, вблизи участков, где есть информация (белые пиксели), на черном поле появляются белые пиксели, и они потом только множатся.

Теперь необходимо провести оценку, насколько первоначальное размытие фильтров ухудшило разрешение после деконволюции. Для этого построим одно и то же сечение (вставка на рис. 4, линия сечения отмечена стрелкой) для всех изображений и оценим разрешение по уровню сигнала

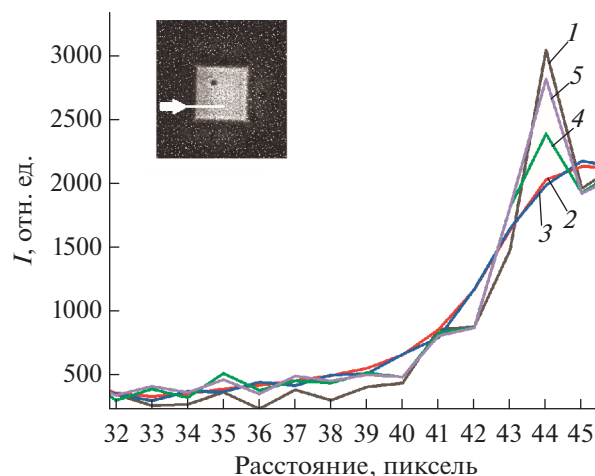


Рис. 4. Профили сечений изображения края окна, полученных после применения различных методов фильтрации и последующей деконволюции: 1 – исходное изображение; 2 – Гауссов фильтр; 3 – фильтр среднего значения; 4 – медианный фильтр; 5 – комбинированный фильтр.

ла 30–70% относительно его максимума. Результат приведен в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что размытие профиля произошло согласно методу фильтрации для ядра фильтра 3×3 . Предложенная нами методика позволяет сохранить разрешение и уменьшить уровень шумов относительно исходного изображения. Медианный фильтр удалил выбросы или провалы интенсивности, но размыл изображение, что является критичным, если у исследуемого объекта есть особенности размером с пиксель.

В качестве еще одного примера приведем изображение, которое получено на зеркальном рентгеновском микроскопе. Это изображение клетки – срез стебля ландыша толщиной 30 мкм. Применим медианный и предложенный в настоящей работе фильтр, проведем процедуру, описанную выше и деконволюцию, и сравним результат.

Из сравнения видно, что после деконволюции появляются новые паразитные шумы рис. 5б (правый нижний угол), если шум не был удален с помощью фильтра. Сравнение рис. 5в и 5г показало, что при применении комбинированного фильтра изображение после деконволюции не размыто.

Таблица 1. Определение разрешения для разных типов фильтров

Метод	Исходное	Гауссов фильтр	Фильтр среднего	Медианный фильтр	Комбинированный метод
Разрешение по уровню сигнала 30–70%, пиксели	1	3	3	2	1

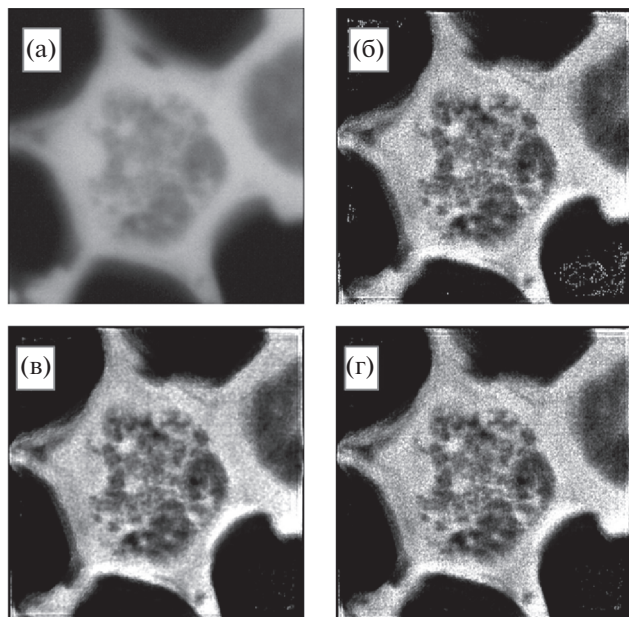


Рис. 5. Изображение клетки стебля ландыша после фильтрации и деконволюции: а – исходное изображение, б – исходное после деконволюции без фильтров, в – медианный фильтр и деконволюция, г – комбинированный фильтр и деконволюция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая методика фильтрации изображений для удаления шумов, которая не приводит к размытию изображений, появление которых связано с нагревом регистрирующей системы зеркального “мягкого” рентгеновского микроскопа. В качестве тест-объекта были использованы изображения квадратного окошка размером 10×10 мкм в пластине кремния и среза стебля ландыша толщиной 30 мкм полученные на зеркальном “мягком” рентгеновском микроскопе. На реальном биологическом объекте удалось устранить более 90% шумов без потери разрешения (без размытия).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФ № 22-62-00068.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wei Z., Wang J., Nichol H., Wiebe S., Chapman D.* // *Micron*. 2012. V. 43. № 2–3. P. 170. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2011.07.009>

2. *Devi T.G., Patil N.* // *Int. Conf. Innovative Trends in Information Technol.* 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICITIIT49094.2020.9071556>
3. *Kushwaha H.S., Tanwar S., Rathore K.S., Srivastava S.* // *Second Int. Conf. Adv. Comput. Comm. Technol.* 2012. P. 276. <https://doi.org/10.1109/ACCT.2012.41>
4. *Roels J., Aelterman J., De Vylder J., Luong H., Saeys Y., Lippens S., Philips W.* // *Adv. Visual Computing*. 2014. V. 8887. P. 31. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14249-4_4
5. *Thanh D.N.H., Dvoenko S.D.* // *Pattern Recognit. Image Anal.* 2016. V. 26. P. 285. <https://doi.org/10.1134/S1054661816020231>
6. *Bovik A., Huang T., Munson D.* // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1985. V. 33. № 5. P. 1253. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1985.1164690>
7. *Nodes T., Gallagher N.* // *IEEE Transactions on Communications* 1984. V. 32. № 5. P. 532. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1984.1096099>
8. *Bovik A.* // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1987. V. 35. № 4. P. 493. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165153>
9. *Florencio D.A.F., Schafer R.W.* // *Proc. SPIE 2308, Visual Communications and Image Processing*. 1994. <https://doi.org/10.1117/12.185969>
10. *Ilke T.* // *Int. J. Electronics Comm.* 2013. V. 67. № 9. P. 771. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2013.03.006>
11. *Wang G., Li D., Pan W., Zang Z.* // *Signal Processing*. 2010. V. 90. № 12. P. 3213. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.05.026>
12. *Мальшеев И.В., Пестов А.Е., Полковников В.Н. и др.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2019. № 1. С. 3. <https://doi.org/10.1134/S0207352819010128>
13. *Akhsakhalyan A.D., Klunokov E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Nechay A.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Slashchenko N.N., Svechnikov M.V., Toropov M.N., Tsybin, N.N., Chkhalo N.I., Shcherbakov A.V.* // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2017. V. 11. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1134/S1027451017010049>
14. *Malyshev I.V., Chkhalo N.I.* // *Ultramicroscopy*. 2019. V. 202. P. 76. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.04.001>
15. *Kumar B.K.S.* // *Signal Image Video Process.* 2013. V. 7. № 6. P. 1159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11760-012-0372-7>
16. *Loupas T., McDicken W., Allan P.* // *IEEE Trans. Circuits Syst.* 1989. V. 36. № 1. P. 129. <https://doi.org/10.1109/31.16577>
17. *Richardson W.H.* // *J. Optical Soc. Am.* 1972. V. 62. P. 55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/JOSA.62.000055>
18. *Lucy L.B.* // *Astrophys. J.* 1974. V. 79. № 6. P. 745. <https://doi.org/10.1086/111605>
19. *Sage D., Donati L., Soulez F. et al.* // *Methods-Image Processing for Biologists*. 2017. V. 115. P. 28. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2016.12.015>
20. *ImageJ.* (2022) <https://imagej.nih.gov/ij/index.htm>

Comparison of Methods for Removing Noise in the Image Obtained in a Mirror Microscope at a Wave Length of 13.84 nm

D. G. Reunov^{1, *}, I. V. Malyshev¹, N. I. Chkhalo¹

¹*Institute of Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

**e-mail: reunov_dima@ipmras.ru*

In this work, we have selected the optimal filtering method and varying its parameters to improve image quality without losing the useful signal. A new method of image filtering is proposed to remove noise, which does not lead to blurring of images. The appearance of noise is associated with heating of the recording system of a mirror “soft” X-ray microscope. At the moment, there are a vast number of methods and algorithms for removing noise from an image. However, for the most part, the methods blur the original image due to filtering according to the filter kernel. This blur leads to a deterioration in resolution or, in general, to the loss of some useful information that can play an important role in the processing of experimental images. A combined image filtering method is proposed, which includes a threshold filter and a median one. This combination allows you to initially find local jumps or dips of the signal (the range of which is set manually), which will later be replaced by median values of the neighborhood of a point on the image. As a result, the median filter is not applied to the entire image, but only where there are sharp changes in intensity, so it does not blur the image as a whole.

Keywords: “soft” X-ray microscopy, axial tomography, noise removal, image filtering, 3D image reconstruction.