

УДК 004.932
<https://doi.org/10.32362/2500-316x-2021-9-6-57-63>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод повышения информативности рентгеновских снимков

Н.Е. Староверов ^{1, @},
А.Ю. Грязнов ¹,
И.Г. Камышанская ^{2, 3},
Н.Н. Потрахов ¹,
Е.Д. Холопова ¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376 Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

³ СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница», Санкт-Петербург, 191014 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: nik0205st@mail.ru

Резюме. Описан основанный на высокочастотной фильтрации и морфологической обработке изображения метод обработки микрофокусных рентгеновских снимков, повышающий контраст деталей рентгенограммы. Одной из наиболее информативных методик рентгенографии является микрофокусная рентгенография. В ряде случаев микрофокусные рентгеновские изображения не могут быть достоверно проанализированы из-за особенностей способа съемки. Так, основными недостатками микрофокусных рентгеновских изображений чаще всего являются неравномерный фон, искаженные яркостные характеристики и наличие шумов. Предлагаемый метод повышения контраста мелких деталей изображения основан на идее сочетания высокочастотной фильтрации и морфологической обработки изображений. Метод состоит из следующих шагов: подавление шумов на изображении, высокочастотная фильтрация, морфологическая обработка изображения, получение результирующего изображения. В результате применения метода усиливается яркость контуров на изображении. На полученном изображении все объекты будут иметь двойные контуры. Метод был апробирован при обработке 50 рентгенограмм органов грудной клетки пациентов с разнообразной патологией. Рентгенограммы были выполнены в городской Мариинской больнице Санкт-Петербурга на цифровых стационарных и передвижных рентгеновских аппаратах. На большей части рентгенограмм удалось улучшить контраст снимков, выделить границы объектов. Также метод был применен в микрофокусной рентгеновской томографии для улучшения информативности проекционных данных и улучшения восстановления 3D-образа объекта исследования. Как для первого, так и для второго случаев метод показал удовлетворительные результаты. Разработанный метод позволяет существенно повысить информативность микрофокусных рентгеновских снимков. Полученные практические результаты позволяют рассчитывать на широкие перспективы применения метода, особенно в микрофокусной рентгенографии.

Ключевые слова: микрофокусная рентгенография, цифровая обработка изображений, фильтрация изображений

• Поступила: 18.03.2021 • Доработана: 19.08.2021 • Принята к опубликованию: 20.08.2021

Для цитирования: Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Камышанская И.Г., Потрахов Н.Н., Холопова Е.Д. Метод повышения информативности рентгеновских снимков. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):57–63. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-57-63>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

The method of increasing the information content of microfocus X-ray images

Nikolay E. Staroverov ^{1, @},
Artem Y. Gryaznov ¹,
Irina G. Kamyshanskaya ^{2, 3},
Nikolay N. Potrakhov ¹,
Ekaterina D. Kholopova ¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376 Russia

² St. Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

³ City Mariinsky Hospital, Saint Petersburg, 191014 Russia

@ Corresponding author, e-mail: nik0205st@mail.ru

Abstract. A method for processing microfocus X-ray images is described. It is based on high-frequency filtration and morphological image processing, which increases the contrast of the X-ray details. One of the most informative X-ray techniques is microfocus X-ray. In some cases, microfocus X-ray images cannot be reliably analyzed due to the peculiarities of the shooting method. So, the main disadvantages of microfocus X-ray images are most often an uneven background, distorted brightness characteristics and the presence of noise. The proposed method for enhancing the contrast of fine image details is based on the idea of combining high-frequency filtering and morphological image processing. The method consists of the following steps: noise suppression in the image, high-frequency filtering, morphological image processing, obtaining the resulting image. As a result of applying the method, the brightness of the contours in the image is enhanced. In the resulting image, all objects will have double outlines. The method was tested in the processing of 50 chest radiographs of patients with various pathologies. Radiographs were performed at the Mariinsky Hospital of St. Petersburg using digital stationary and mobile X-ray machines. In most of the radiographs, it was possible to improve the images contrast, to highlight the objects boundaries. Besides, the method was applied in microfocus X-ray tomography to improve the information content of projection data and improve the reconstruction of the 3D image of the research object. In both the first and second cases, the method showed satisfactory results. The developed method makes it possible to significantly increase the information content of microfocus X-ray images. The obtained practical results make it possible to count on broad prospects for the method application, especially in microfocus X-ray.

Keywords: microfocus X-ray, digital image processing, image filtering

• Submitted: 18.03.2021 • Revised: 19.08.2021 • Accepted: 20.08.2021

For citation: Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kamyshanskaya I.G., Potrakhov N.N., Kholopova E.D. The method of increasing the information content of microfocus X-ray images. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):57–63 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-57-63>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, рентгенография – метод изучения структуры объекта исследования с помощью рентгеновского излучения. Одной из наиболее информативных методик ее применения является микрофокусная рентгенография, которая проводится с использованием источников излучения, имеющих размер фокусных пятен менее 100 мкм.

Применение этих источников дает возможность получать изображения с прямым геометрическим (проекционным) увеличением изображения в 5–20 раз. Сегодня микрофокусная рентгенография широко используется в медицине, при оценке качества сельскохозяйственных культур, а также в неразрушающем промышленном контроле [1–6].

Однако в ряде случаев микрофокусные рентгеновские изображения не могут быть достоверно проанализированы из-за неудовлетворительного качества изображения. Так, основными недостатками микрофокусных рентгеновских изображений чаще всего являются неравномерный фон, искаженные яркостные характеристики и наличие шумов. Широко распространенные алгоритмы повышения контраста [4–10] в ряде случаев не позволяют увеличить контраст рентгеновских изображений, сохраняя при этом уровень шума на приемлемом уровне.

Разработанный метод решает эту проблему, повышая контраст деталей структуры объекта без значимого увеличения шума на изображении.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТА МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предлагаемый метод повышения контраста мелких деталей изображения основан на идее сочетания высокочастотной фильтрации и морфологической обработки изображений. Метод состоит из следующих шагов: подавление шумов на изображении, высокочастотная фильтрация, морфологическая обработка изображения, получение результирующего изображения.

Для шумоподавления использовался адаптивный медианный фильтр [4, 11].

Высокочастотная фильтрация осуществлялась изменением Фурье-образа изображения при помощи его умножения на образ фильтра Гаусса высоких частот.

Фильтр Гаусса в частотной области задавался согласно выражению:

$$H(u, v) = 1 - e^{-D^2(u, v) / 2D_0^2},$$

где D_0 – заданная константа, принимающая значения больше нуля, а $D(u, v)$ – расстояние в частотной области от точки (u, v) до начала координат.

Таким образом, после этого фильтра на изображении были значительно ослаблены составляющие низких частот, в то время как составляющие высоких частот остались без изменений. Иными словами, яркость участков с медленным изменением этого параметра была значительно снижена, а участки, где происходят резкие перепады яркости (границы объектов), остались без изменений.

Следующим шагом являлась морфологическая обработка изображения [12]. Для морфологического наращивания (дилатации) применяется структурный элемент квадратной формы размером 9 пикселей. После выполнения данной операции толщина всех объектов на изображении увеличивается на 2 пикселя.

Наращивание изображения A структурным элементом B обозначается $A \oplus B$ и задается выражением:

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b.$$

Структурный элемент B применяется ко всем пикселям изображения. Каждый раз, когда начало координат структурного элемента совмещается с единичным пикселем, ко всему структурному элементу применяется перенос и последующее логическое сложение с соответствующими пикселями изображения.

На следующем этапе изображение после высокочастотного фильтра умножается на константу (в зависимости от яркости и контраста изображения значение константы изменяется от 1.2 до 1.8), после чего производится вычитание из него изображения, полученного морфологическим наращиванием и также умноженного на константу [13]. Получаемое изображение описывается выражением:

$$I_{res} = I + I_s \times C_1 - I_m \times C_2,$$

где I – исходное изображение; I_s – изображение, полученное после высокочастотной фильтрации; C_1, C_2 – положительные константы; I_m – изображение, полученное морфологическим наращиванием.

В результате усиливается яркость контуров на изображении. На полученном изображении все объекты будут иметь двойные контуры: в случае негативного изображения (на котором более плотные структуры имеют большую яркость) появятся внутренний контур, пиксели которого имеют большую яркость, чем объект, и внешний контур, пиксели которого имеют меньшую яркость, чем объект [14, 15]. Для позитивного изображения алгоритм реализуется схожим образом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пример работы алгоритма иллюстрируется на рис. 1, где показаны рентгеновские снимки грудной клетки до и после применения методики. На снимке значительно возросли как резкость, так и контраст небольших деталей изображения. При этом не фиксируется повышение шума на изображении, проще становится визуальный анализ. Применение

предложенного метода позволяет более точно обнаружить поражения легкого.

Метод был апробирован в обработке 50 рентгенограмм органов грудной клетки (ОГК) пациентов с разнообразной патологией. Рентгенограммы были выполнены в городской Мариинской больнице Санкт-Петербурга на цифровых стационарных и передвижных рентгеновских аппаратах. На серии рентгенограмм с синдромом обширного неоднородного

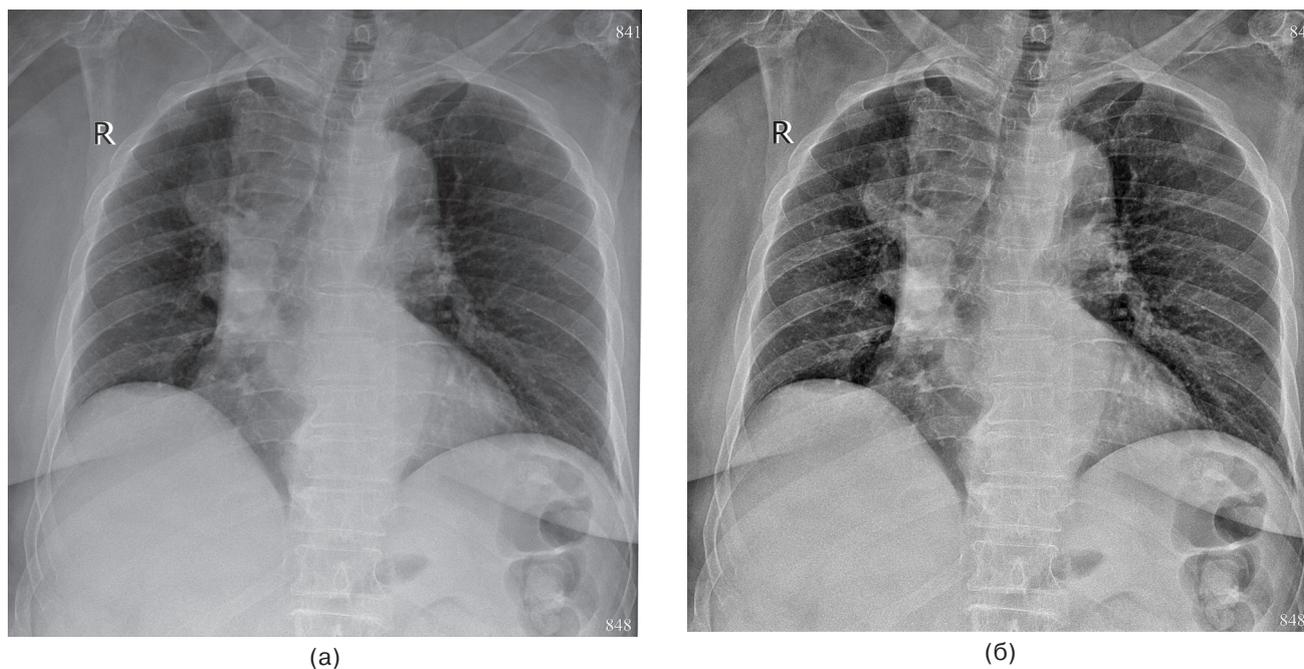


Рис. 1. Рентгеновские снимки грудной клетки: (а) – до обработки; (б) – после обработки

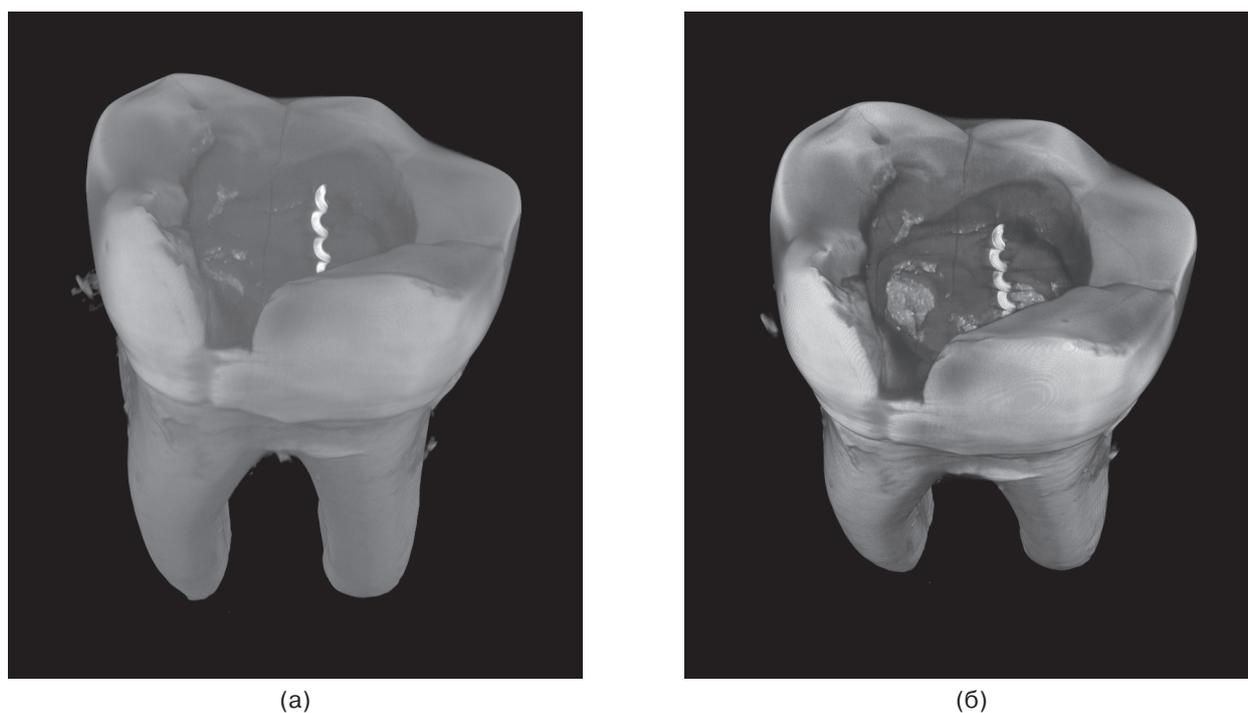


Рис. 2. Восстановленные результаты томографического исследования зуба: (а) – до обработки; (б) – после обработки

затенения обоих легких цифровая обработка данным методом позволила локализовать и выделить: ограниченные участки повышенной прозрачности; неравномерность утолщения деформированного легочного рисунка за счет интерстициального компонента; неоднородность инфильтрации легочной ткани; границы плеврального выпота. На серии рентгенограмм с синдромом очагового поражения легких метод позволил четко визуализировать границы малоинтенсивных очагов, выявив в них едва заметные участки деструкции. На рентгенограммах ОГК пациентов с ковид-пневмонией постобработка улучшила контраст и границы полисегментарных, разнокалиберных очагов и зон инфильтрации. На рентгенограммах пациентов с травматическим повреждением ОГК метод позволит обозначить едва уловимые признаки перелома ребер, пневмомедиастинума и плащевидного пневмоторакса.

Также метод был применен в микрофокусной рентгеновской томографии для улучшения информативности проекционных данных и улучшения восстановления 3D-образа объекта исследования. Как для первого, так и для второго случая метод показал удовлетворительные результаты. Для анализа

томографических данных были использованы срезы, полученные на микрофокусном рентгеновском томографе МРКТ-04 при исследовании препаратов человеческих зубов. Результаты восстановления без использования разработанного метода показаны на рис. 2а, с использованием разработанного метода – на рис. 2б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено алгоритмическое обеспечение метода повышения информативности рентгеновских изображений, в первую очередь – контраста. В целом ряде областей применения рентгенографии метод позволяет существенно повысить обнаружение на изображении объекта исследования малоконтрастных и малоразмерных деталей его структуры.

Полученные практические результаты позволяют рассчитывать на широкие перспективы применения метода, особенно в микрофокусной рентгенографии.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., et al. X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science. *Tech. Phys.* 2019;64(4):582–592. <https://doi.org/10.1134/S1063784219040030>
2. Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Бессонов В.Б., Ободовский А.В., Староверов Н.Е., Холопова Е.Д. Микрофокусная рентгенография в медицине: физико-технические особенности и современные средства рентгенодиагностики. *Биотехносфера*. 2015;5(41):55–63.
3. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D. Digital x-ray image processing with using adaptive histogram equalization and adaptive background correction. *Biomedicine Radioengineering = Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2018;5:56–58.
4. Staroverov N.E., Kholopova E.D., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K. The methods of processing of microfocus X-ray images. In: *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2017, p. 745–747. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2017.7910665>
5. Мазуров А.И., Потрахов Н.Н. Возможности и ограничения микрофокусной рентгенографии в медицине. *Биотехносфера*. 2010;4(10):20–23.
6. Грязнов А.Ю., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н. Портативная установка для рентгеновского экспресс-контроля качества пищевой продукции. *Биотехносфера*. 2009;6(6):26–28.
7. Stark J.A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization. *IEEE Trans. Image Process.* 2000;9(5):889–896. <https://doi.org/10.1109/83.841534>

REFERENCES

1. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., et al. X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science. *Tech. Phys.* 2019;64(4):582–592. <https://doi.org/10.1134/S1063784219040030>
2. Potrakhov N.N., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K., Bessonov V.B., Obodovskii A.V., Staroverov N.E., Kholopova E.D. Microfocus X-ray diagnostics in medicine: physical and technical features and modern device. *Biotechnosfera*. 2015;5(41):55–63 (in Russ.).
3. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D. Digital x-ray image processing with using adaptive histogram equalization and adaptive background correction. *Biomedicine Radioengineering = Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2018;5:56–58.
4. Staroverov N.E., Kholopova E.D., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K. The methods of processing of microfocus X-ray images. In: *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2017, p. 745–747. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2017.7910665>
5. Mazurov A.I., Potrakhov N.N. Possibilities and limitations of microfocus radiography in medicine. *Biotechnosfera*. 2010;4(10):20–23 (in Russ.).
6. Gryaznov A.Yu., Potrakhov E.N., Potrakhov N.N. Portable unit for X-ray express quality food products. *Biotechnosfera*. 2009;6(6):26–28 (in Russ.).
7. Stark J.A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization. *IEEE Trans. Image Process.* 2000;9(5):889–896. <https://doi.org/10.1109/83.841534>

8. Mukhopadhyay S., Chanda B. A multiscale morphological approach to local contrast enhancement. *Signal Process.* 2000;80(4):685–696. [https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(99\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(99)00161-9)
9. Parihar A.S., Verma O.P., Khanna C. Fuzzy-contextual contrast enhancement. *IEEE Trans. Image Process.* 2017;26(4):1810–1819. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2665975>
10. Pogany A., Gao D., Wilkins S.W. Contrast and resolution in imaging with a microfocus x-ray source. *Rev. Sci. Instrum.* 1997;68(7):2774–2782. <https://doi.org/10.1063/1.1148194>
11. Pizer S.M., Amburn E.P., Austin J.D., et al. Adaptive histogram equalization and its variations. *Comput. Vis. Graph. Image Process.* 1987;39(3):355–368. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(87\)80186-X](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80186-X)
12. Vincent L. Morphological grayscale reconstructions in image analysis: Applications and efficient algorithms. *IEEE Trans. Image Process.* 1993;2(2):176–201. <https://doi.org/10.1109/83.217222>
13. Грязнов А.Ю., Гук К.К., Староверов Н.Е., Холопова Е.Д. Метод повышения резкости и контрастности деталей рентгеновских изображений. *Физические основы приборостроения.* 2019;8(4(34)):34–37. <https://doi.org/10.25210/jfop-1904-034037>
14. Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Потрахов Н.Н., Холопова Е.Д., Гук К.К. Новые методы цифровой обработки микрофокусных рентгеновских изображений. *Медицинская техника.* 2018;52(6):53–55.
15. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D., Guk K.K. Microelectronic devices digital X-ray image processing method development. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;967(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/967/1/012016>
8. Mukhopadhyay S., Chanda B. A multiscale morphological approach to local contrast enhancement. *Signal Process.* 2000;80(4):685–696. [https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(99\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(99)00161-9)
9. Parihar A.S., Verma O.P., Khanna C. Fuzzy-contextual contrast enhancement. *IEEE Trans. Image Process.* 2017;26(4):1810–1819. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2665975>
10. Pogany A., Gao D., Wilkins S.W. Contrast and resolution in imaging with a microfocus x-ray source. *Rev. Sci. Instrum.* 1997;68(7):2774–2782. <https://doi.org/10.1063/1.1148194>
11. Pizer S.M., Amburn E.P., Austin J.D., et al. Adaptive histogram equalization and its variations. *Comput. Vis. Graph. Image Process.* 1987;39(3):355–368. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(87\)80186-X](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80186-X)
12. Vincent L. Morphological grayscale reconstructions in image analysis: Applications and efficient algorithms. *IEEE Trans. Image Process.* 1993;2(2):176–201. <https://doi.org/10.1109/83.217222>
13. Gryaznov A.Yu., Guk K.K., Staroverov N.E., Kholopova E.D. Method for sharpening and contrasting details of X-ray images. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya = Physical Bases of Instrumentation.* 2019;8(4(34)):34–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.25210/jfop-1904-034037>
14. Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu., Potrakhov N.N., Kholopova E.D., Guk K.K. New methods of digital processing of microfocus X-ray images. *Biomed. Eng.* 2019;52:435–438. <https://doi.org/10.1007/s10527-019-09864-6> [Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu., Potrakhov N.N., Kholopova E.D., Guk K.K. New methods of digital processing of microfocus X-ray images. *Meditinskaya tekhnika.* 2018;52(6):53–55 (in Russ.).]
15. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D., Guk K.K. Microelectronic devices digital X-ray image processing method development. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;967(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/967/1/012016>

Об авторах

Староверов Николай Евгеньевич, аспирант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: nik0205st@mail.ru. Scopus Author ID 57193738290, <https://orcid.org/0000-0002-4404-5222>

Грязнов Артем Юрьевич, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: ay.gryaznov@yandex.ru. Scopus Author ID 12142307400. <https://orcid.org/0000-0003-2062-2213>

Камышанская Ирина Григорьевна, к.м.н., доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9); врач-рентгенолог рентгеновского отделения, СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница» (191014, Россия, Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 56). E-mail: o.kafedra@mail.ru. Scopus Author ID 15834578000.

Потрахов Николай Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: kzhamaova@gmail.com. Scopus Author ID 8689381700. <https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Холопова Екатерина Дмитриевна, аспирант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: wkhopolova@gmail.com. Scopus Author ID 57193737033. <https://orcid.org/0000-0002-9103-0066>

About the authors

Nikolay E. Staroverov, Post-graduate Student, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail: nik0205st@mail.ru. Scopus Author ID: 57193738290, <https://orcid.org/0000-0002-4404-5222>

Artem Y. Gryaznov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail ay.gryaznov@yandex.ru. Scopus Author ID 12142307400. <https://orcid.org/0000-0003-2062-2213>

Irina G. Kamyshanskaya, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, St. Petersburg State University (7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia); Radiologist of the X-ray Department, St. Petersburg State Budgetary Educational Institution «Mariinsky City Hospital» (56, Liteiny pr., St. Petersburg, 191014 Russia). E-mail: o.kafedra@mail.ru. Scopus Author ID 15834578000.

Nikolay N. Potrakhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail: kzhomova@gmail.com. Scopus Author ID 8689381700. <https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Ekaterina D. Kholopova, Post-graduate Student, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail: wkhlopova@gmail.com. Scopus Author ID 57193737033. <https://orcid.org/0000-0002-9103-0066>