

УДК 004.932

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.020](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.020)

Алгоритм определения угла между направлениями шлифовки поверхности

А.Г. Шмидт, А.А. Алтухов, В.С. Фещенко, В.А. Шепелев✉

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Резюме. Работа посвящена разработке алгоритма анализа изображений профилограмм, полученных с помощью оптического профилометра ZYGO ZeGage Pro HR, с целью определения некоторых параметров обработки поверхности материала: направлений шлифовки и угла между ними. Анализ таких данных позволяет устанавливать связь между применяемой технологией обработки материала и качеством получаемой поверхности. Необходимость автоматизации данного процесса является актуальной задачей, решение которой позволит сократить время анализа большого объема исследуемых образцов и ускорить проверку их качества. В данной исследовательской работе представлен процесс функционирования разработанного алгоритма, основанного на применении методов обнаружения геометрических объектов на изображениях. Алгоритм состоит из нескольких этапов, включая предварительную обработку входных данных, методы обнаружения прямых линий на изображении, выделение направлений шлифовки поверхности и определение угла между ними. Кроме того, в рамках исследования была предложена модификация алгоритма, основанная на частотном анализе изображений. Данная модификация позволяет устранить описанные в работе недостатки основной реализации, вызванные спецификой входных данных, и повысить эффективность работы программы. Также приведены выводы по результатам проверки точности разработанного алгоритма и его модификации, полученные на разных образцах исследуемых поверхностей.

Ключевые слова: анализ изображений, нахождение линий на изображении, вычисление углов, алмазная подложка, шлифовка поверхности.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFZ-2022-0006).

Для цитирования: Шмидт А.Г., Алтухов А.А., Фещенко В.С., Шепелев В.А. Алгоритм определения угла между направлениями шлифовки поверхности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1416> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.020

Algorithm for determining the angle between the directions of surface grinding

A.G. Shmidt, A.A. Altukhov, V.S. Feshchenko, V.A. Shepelev✉

MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. The paper discusses the development of an algorithm for analyzing profilogram images obtained using the ZYGO ZeGage Pro HR optical profilometer in order to determine some parameters of material surface treatment: grinding directions and the angle between them. The analysis of such data makes it possible to make a connection between the applied material processing technology and the quality of the resulting surface. The need to automate this process is a relevant objective. Solving it will reduce the time taken to analyze a large volume of test samples and accelerate their quality control. This paper presents the process of the developed algorithm operation based on the application of methods for detecting geometric objects in images. The algorithm consists of several stages, including pre-processing of input data, methods for detecting straight lines in the image, extracting surface grinding directions, and determining the angle between them. In addition, as part of the study, a modification of

the algorithm based on image frequency analysis was proposed. This modification allows eliminating the shortcomings of the main implementation described in the paper determined by the specifics of the input data; it also enables the increase in the efficiency of the program. Also, conclusions are given on the results of accuracy tests for the developed algorithm and its modification obtained using different samples of the surfaces under study.

Keywords: image analysis, finding lines in an image, calculating angles, diamond plate, surface polishing.

Acknowledgements: the research was conducted as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject No. FSFZ-2022-0006).

For citation: Shmidt A.G., Altukhov A.A., Feshchenko V.S., Shepelev V.A. Algorithm for selecting the directions of surface grinding and determining the angle between them. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1416> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.020 (In Russ.).

Введение

Среди свойств перспективных материалов для микроэлектроники можно выделить те, которые обуславливают стойкость изготавливаемых на их основе изделий к внешним воздействиям в применениях, с одной стороны. С другой – такие свойства (механические, химические, термические) обуславливают особенности их обработки и их зависимость от деталей процессов в производстве. Это относится к подложкам искусственного алмаза [1-5] и к шлифовке их поверхностей, что приводит к тому, что разные партии подложек [6] различаются по потребительским качествам и свойствам.

Таким образом, определение параметров поверхности подложек является важным аспектом при их производстве. Сбор и анализ таких данных позволяет не только контролировать технологии обработки материалов, но и улучшать качество выпускаемой продукции. Получаемые данные могут использоваться в цифровых двойниках изделий, позволяющих хранить подробное, численное описание изделия или процесса, в том числе и на микроскопическом уровне [7-9].

Одним из таких параметров является направление неровностей поверхности. Он позволяет установить связь между применяемыми методами обработки материала и качеством получаемой поверхности. Поэтому задача разработки алгоритма определения угла между направлениями шлифовки поверхности алмазной подложки (пластины) является актуальной.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является разработка алгоритма определения угла между направлениями шлифовки поверхности. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Определить направления шлифовки поверхности на изображении.
2. Определить значение угла между ними.

Материалы и методы

Для решения задач данной работы был разработан следующий алгоритм (Рисунок 1), состоящий из 5 этапов.



Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма определения угла между направлениями шлифовки
 Figure 1 – Block diagram of the algorithm for determining the angle between the grinding directions

Алгоритм реализован на языке программирования Python. Для обработки изображений используется библиотека OpenCV. Это библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом. Построение графиков реализовано с использованием библиотеки Matplotlib. В качестве входных данных использовались изображения профилограмм поверхностей алмазных пластин, полученные с помощью оптического профилометра ZeGag Pro HR, в формате «.png» (Рисунок 2 (а)).

Первый этап – это предобработка входного изображения, который состоит из двух шагов:

- 1) обрезка исходного изображения;
- 2) перевод в градации серого.

Первое делается для того, чтобы избавиться от лишних деталей исходного изображения профилограммы и выделить исследуемую область, а второе служит для более четкого выделения границ и форм объектов.

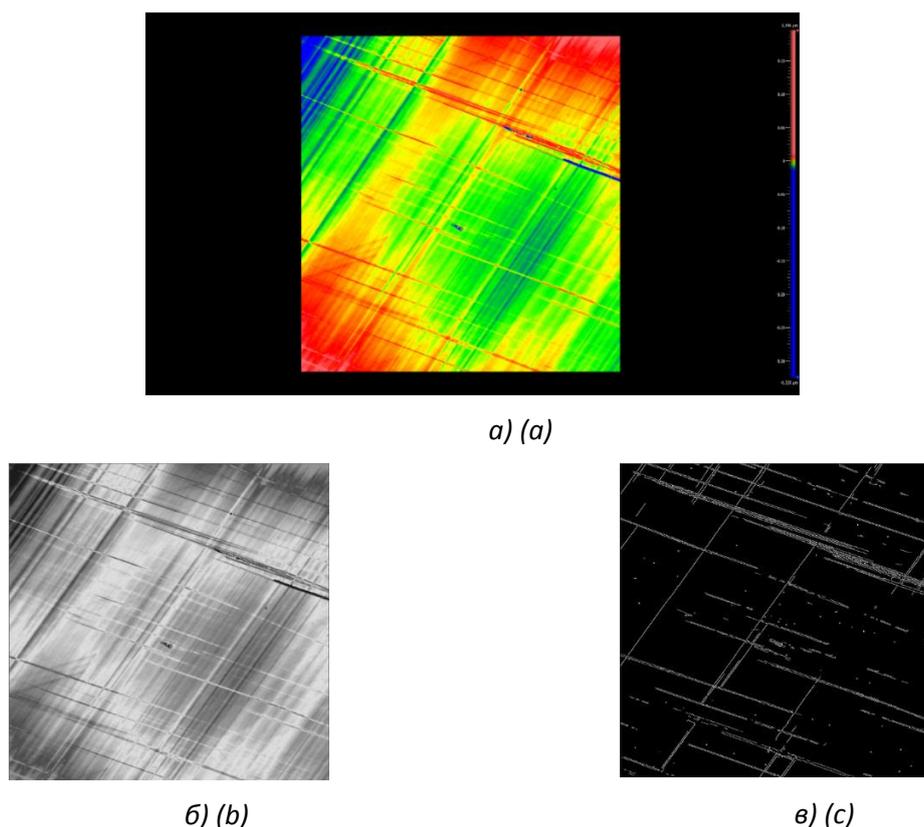


Рисунок 2 – Исходное изображение (а); Изображение после предобработки (б); Обработка детектором границ Кэнни (в)

Figure 2 – Original image (a); Image after preprocessing (b); Processing with the Canny Edge Detector (c)

На втором этапе происходит выделение границ объектов на изображении. Данный этап реализуется с помощью детектора границ Кэнни, который позволяет избавиться от шумов и выделить основные контуры на изображении. Пример получаемого изображения приведен на Рисунке 2 (в).

Третий этап – определение прямых линий. Для этого к полученному на предыдущем этапе изображению применяется преобразование Хафа [10]. Преобразование Хафа предназначено для поиска геометрических объектов на изображении, принадлежащих определенному классу фигур с использованием процедуры голосования.

В результате на данном этапе получаем массив с координатами двух точек для каждой из найденных прямых на изображении. На Рисунке 3 приведены множества точек прямых, полученных за счет преобразования Хафа.

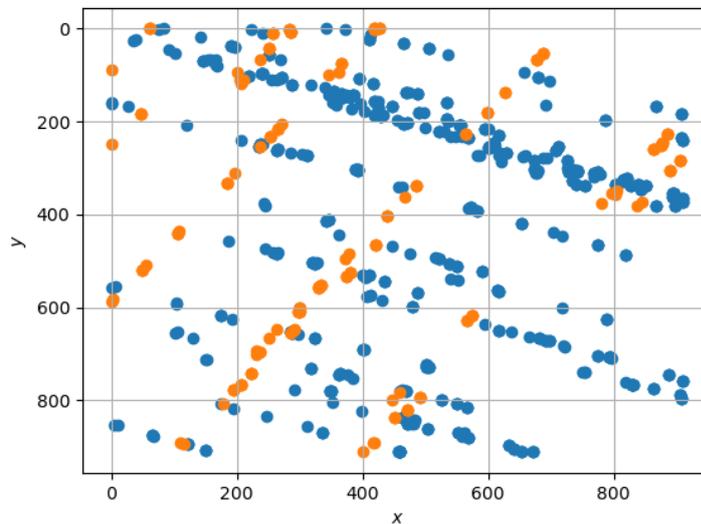


Рисунок 3 – Множества точек, которые получены при преобразовании Хафа
Figure 3 – Sets of points obtained by the Hough transform

Следующий этап – выделение направлений шлифовки поверхности. Для этого необходимо выполнить следующие шаги:

- 1) вычислить угловые коэффициенты для прямых, найденных на предыдущем этапе;
- 2) сформировать множества схожих по направлению прямых;
- 3) найти среднее значение углового коэффициента для каждого множества.

Угловые коэффициенты вычисляются как отношение разностей координат точек прямых. Отличие направления прямых определяется различием знака угловых коэффициентов. Если же угловые коэффициенты имеют один знак, то направления прямых считаются отличными в том случае, когда разница между их угловыми коэффициентами составляет более 0.2.

В итоге получаем два множества прямых с примерно одинаковыми угловыми коэффициентами.

Для каждого из этих множеств вычисляется среднее значение углового коэффициента, которое и определяет основное направление шлифовки поверхности. Далее эти значения будут использованы для нахождения угла. На Рисунке 4 приведено сравнение итоговых направлений шлифовки (синяя и оранжевая линии) с множеством точек, полученных на этапе № 3.

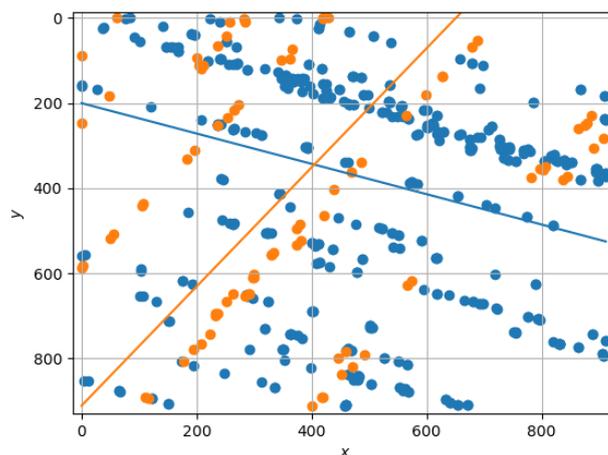


Рисунок 4 – Сравнение результатов
Figure 4 – Comparison of results

Завершающий этап – вычисление угла между полученными прямыми. Угол вычисляется по формуле:

$$angle = \arctan \left(\left| \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2} \right| \right), \quad (1)$$

где k_1, k_2 – угловые коэффициенты прямых. Формула (1) следует из простого тригонометрического соотношения между тангенсами двух углов и тангенсом их разности.

Разработанный алгоритм позволяет вычислять угол при наличии ярко выраженных линий на изображении, но плохо работает, когда качество обработки поверхности более высокое. В этом случае при выделении границ на изображении возникает слишком много шумов, что мешает точно определить направление штрихов.

Для этого случая нами был разработан алгоритм, который использует частотный анализ изображений на основе преобразования Фурье (Рисунок 5).

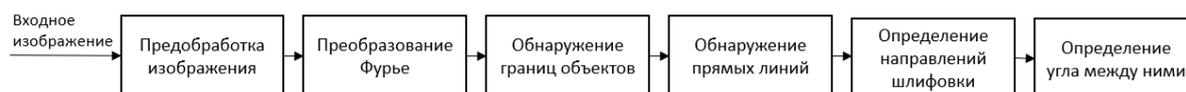


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма, основанного на частотном анализе
Figure 5 – Block diagram of an algorithm based on frequency analysis

Данный алгоритм идентичен описанному выше, за исключением того, что для выделения направлений шлифовки к предварительно обработанному изображению поверхности применяется быстрое преобразование Фурье [10]. В отличие от обычного преобразования Фурье, такой способ позволяет существенно снизить время производимых вычислений.

Далее анализируется Фурье-спектр изображения. Для более удобного восприятия и анализа производится центрирование спектра (Рисунок 6 (а)).

На Рисунке 6 (б, в) представлены изображения после обработки детектором границ Кэнни и множество полученных преобразованием Хафа точек прямых линий.

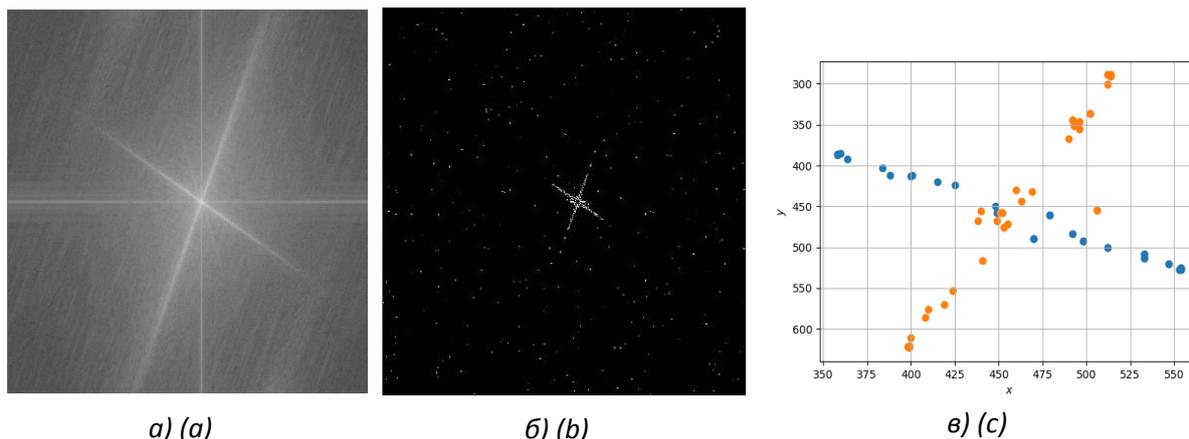


Рисунок 6 – Фурье-спектр изображения (а); Выделение контуров детектором границ Кенни (б); Множества точек, полученных преобразованием Хафа (в)
Figure 6 – Fourier spectrum of the image (a); Identification of contours by the Kenny boundary detector (b); Sets of points obtained by the Hough transform (c)

Результаты

Направления шлифовки поверхности были нами определены способом, описанным выше. На Рисунке 7 приведено сравнение итоговых направлений и множеств точек линий, полученных преобразованием Хафа.

Угол между направлениями шлифовки определяется как угол между линиями на спектре. Это объясняется тем, что преобразование Фурье является ортогональным и изображенные на спектре линии (Рисунок 6 (а)) будут строго перпендикулярны штрихам на поверхности, а соответственно и углы между ними будут совпадать.

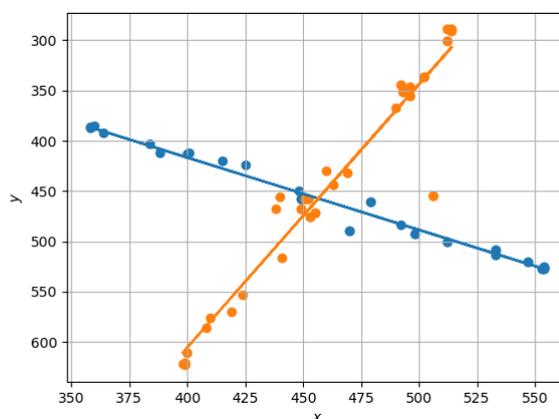


Рисунок 7 – Направления линий на спектре Фурье, полученные в результате работы алгоритма
Figure 7 – Directions of the lines on the Fourier spectrum obtained by using the algorithm

Обсуждение

Анализ изображения спектра Фурье позволяет обнаружить направления шлифовки как при четко выраженных линиях на исходном изображении, так и на сильно смазанном с нечетко выраженными контурами. Это делает данную модификацию алгоритма более универсальной и применимой для большего количества анализируемых изображений.

Используемые входные данные, т. е. получаемые изображения профилограмм, позволяют в некоторых случаях измерять углы между направлениями полировки

вручную и напрямую (например, на производстве, при выходном контроле и т. д.). Это позволило получить эталонные значения углов, которые использовались при оценке точности разработанного алгоритма.

Для этого была проведена серия экспериментов, в ходе которой точность определялась путем сравнения значений, полученных при работе алгоритма, и эталонных измерений углов. На основании этих результатов заключено, что погрешность алгоритма составила от $0,5^\circ$ до 1° .

Заключение

В ходе работы был разработан алгоритм выделения направления шлифовки поверхности и использован для алмазной пластины. После первого этапа его разработки данный алгоритм позволяет выделить направления шлифовки при наличии ярко выраженных линий на изображении, но плохо работает, когда качество обработки поверхности более высокое. Далее этот алгоритм был модифицирован за счет добавления анализа изображения спектра Фурье, что позволило обнаружить направления шлифовки как при четко выраженных линиях на исходном изображении, так и на сильно смазанном с нечетко выраженными контурами. Это делает модификацию алгоритма более универсальной и применимой для большего количества анализируемых изображений. Погрешность при работе алгоритма составляла от 0.5° до 1° .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. May P.W. Diamond thin films: a 21st-century material. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 2000;358:473–495.
2. Mc'Scimin H.I. Elastic moduli of diamond. *Phys. Review.* 1957;5(1):116–120.
3. Nelson A. The compressive strength of perfect diamond. *Appl. Phys.* 1979;4:2763–2764.
4. Field I.E. Strength testing of diamond. *Ind. Diamond Rev.* 1974;7:255–259.
5. Wodniak I. CVD diamond detectors for fast alpha particles escaping from the tokamak D-T plasma. *Nucleonika.* 2011;56:143–147.
6. Klepikov I.V., Koliadin A.V., Vasilev E.A. Analysis of type IIb synthetic diamond using FTIR spectrometry. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2017;286:012035. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012035.
7. Nikitina M.A., Chernukha I.M., Lisitsyn A.B. About a “digital twin” of a food product. *Theory and practice of meat processing.* 2020;1:4–8. DOI: 10.21323/2414-438X-2020-5-1-4-8.
8. Zongyan W. Digital twin technology. *IntechOpen.* 2020;2–21. DOI: 10.5772/intechopen.80974.
9. Grieves M. Origins of the digital twin concept. *Florida Institute of Technology: Melbourne, FL, USA.* 2016;8. DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений.* М.: Техносфера; 2005. 1072 с.

REFERENCES

1. May P.W. Diamond thin films: a 21st-century material. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 2000;358:473–495.
2. Mc'Scimin H.I. Elastic moduli of diamond. *Phys. Review.* 1957;5(1):116–120.
3. Nelson A. The compressive strength of perfect diamond. *Appl. Phys.* 1979;4:2763–2764.
4. Field I.E. Strength testing of diamond. *Ind. Diamond Rev.* 1974;7:255–259.
5. Wodniak I. CVD diamond detectors for fast alpha particles escaping from the tokamak D-T plasma. *Nucleonika.* 2011;56:143–147.

6. Klepikov I.V., Koliadin A.V., Vasilev E.A. Analysis of type IIb synthetic diamond using FTIR spectrometry. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017;286:012035. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012035.
7. Nikitina M.A., Chernukha I.M., Lisitsyn A.B. About a “digital twin” of a food product. *Theory and practice of meat processing*. 2020;1:4–8. DOI: 10.21323/2414-438X-2020-5-1-4-8.
8. Zongyan W. Digital twin technology. *IntechOpen*. 2020;2–21. DOI: 10.5772/intechopen.80974.
9. Grieves M. Origins of the digital twin concept. *Florida Institute of Technology: Melbourne, FL, USA*. 2016;8. DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
10. Gonzalez R., Wood R. *Digital image processing*. Moscow, Technosphaera; 2005. 1072 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шмидт Александр Геннадьевич, инженер, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: shmidt@mirea.ru

ORCID: [0009-0006-6061-1518](https://orcid.org/0009-0006-6061-1518)

Aleksandr Gennadevich Shmidt, Engineer, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Алтухов Андрей Александрович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: altuhov_a@mirea.ru

ORCID: [0000-0002-3106-0001](https://orcid.org/0000-0002-3106-0001)

Andrey Aleksandrovich Altukhov, Candidate of Technical Sciences, Laboratory Chief, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Фещенко Валерий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: feshchenko@mail.ru

ORCID: [0000-0002-9863-1622](https://orcid.org/0000-0002-9863-1622)

Valeriy Sergeevich Feshchenko, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Senior Researcher, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Шепелев Валерий Андреевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: shepelev@mirea.ru

ORCID: [0000-0003-2595-5527](https://orcid.org/0000-0003-2595-5527)

Valeriy Andreevich Shepelev, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 14.09.2023.

The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 05.09.2023; accepted for publication 14.09.2023.