

Использование количественных характеристик изображения документов для идентификации лазерных принтеров

 С.М. Петров

Федеральное бюджетное учреждение Калининградская лаборатория судебной экспертизы Министерства юстиции Российской Федерации, Калининград 236035, Россия

Аннотация. В статье представлены краткий обзор современного состояния теории и практики идентификации лазерных принтеров и результаты исследовательской работы, направленной на поиск индивидуальных признаков печатающего механизма лазерного принтера.

Рассмотрена схема лазерного принтера, дано описание цикла печати, изложены основные результаты анализа механизма принтера и влияния его отдельных деталей на оптическую плотность печати. Предложен метод оценки оптической плотности печати по цифровому изображению документа, разобран комплекс необходимых для этого технических и программных средств.

Выдвинута и подтверждена гипотеза о корреляции между колебаниями оптической плотности печати сплошных заливок и колебаниями площади печатных элементов, предложено наглядное представление результатов исследования в графическом виде, обоснована взаимосвязь формы полученных графиков с дефектами узлов и деталей принтера. Предложены способы выявления неоднородности плотности печати на массивах текста по изменениям площади печатных элементов и обработки результатов, что позволяет сравнивать распределения для текстов, напечатанных шрифтами различного размера и начертания. На экспериментальном материале обоснована индивидуальность формы полученных распределений и возможность их использования в качестве идентифицирующих признаков устройства печати.

Ключевые слова: *техническая экспертиза документов, криминалистическая идентификация, электрофотография, лазерный принтер, положение, количественные идентификационные признаки, детали принтера, плотность печати, распределение величин, корреляция*

Для цитирования: Петров С.М. Использование количественных характеристик изображения документов для идентификации лазерных принтеров // Теория и практика судебной экспертизы. 2021. Т. 16. № 2. С. 69–88. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2021-2-69-88>

Using Quantitative Characteristics of Document Images for Identification of Laser Printers

 Sergei M. Petrov

Kaliningrad Laboratory of Forensic Science of the Ministry of Justice of the Russian Federation, Kaliningrad 236035, Russia

Abstract. The article provides a brief overview of the current state of the theory and practice of identifying laser printers and the results of research work aimed at discovering individual features of the printing mechanism of a laser printer.

The author analyses the scheme of a laser printer, describes the printing cycle, presents the main results of the analysis of a printer's mechanism and the influence of its individual parts on the optical density of printing. The method of assessment of the optical density of the print by the digital image of the printed document is proposed, the complex of the necessary technical and program tools is described.

A hypothesis on the correlation between fluctuations in the optical density of printing of solid fills and fluctuations in the area of printed elements was put forward and confirmed; a visual representation of the study results in graphical form is presented, the relationship between the shape of the obtained graphs and defects of the printer's components and parts is substantiated. The author proposes ways to detect the inhomogeneity of printing density on text arrays based on changes in the area of printed elements and processing of the results, which allows comparing distributions for texts printed in fonts of different sizes and styles. Based on experimental material, the individuality of the form of the obtained distributions and the possibility of their use as identifying features of the printing device are substantiated.

Keywords: *questioned documents examination, forensic identification, electrophotography, laser printer, banding, quantitative identification features, printer parts, print density, distribution of values, correlation*

For citation: Petrov S.M. Using Quantitative Characteristics of Document Images for Identification of Laser Printers. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2021. Vol. 16. No. 2. P. 69–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2021-2-69-88>

Введение

Лазерные принтеры, МФУ¹ и копиры заняли в 2020 г. около 70 % рынка печатающих устройств, основными производителями на котором являются фирмы Hewlett-Packard (41 %), Canon (21 %), Epson (16 %) и Brother (9 %). В связи с этим закономерно внимание, которое судебные эксперты уделяют электрофотографическим печатающим устройствам и напечатанным с их помощью документам. Это находит отражение в большом количестве научно-исследовательских и методических публикаций как отечественных, так и зарубежных исследователей.

Однако до сих пор в российской экспертной практике единственным методом идентификации лазерных принтеров являлся метод, основанный на сравнении следов дефектов фотобарабана [1, 2]. Иные подходы, например идентификация по скрытым меткам [2] или по следам механизма подачи бумаги [3, 4], а также по частотно-контрастной характеристике устройства [5], существенного влияния на экспертную практику не оказали.

Метод идентификации по следам дефектов фотобарабана основан на сравнении качественных признаков печатающего устройства. Его логическим развитием было бы включение в перечень признаков не только дефектов фотобарабана, отображающихся на документе в виде мелких повторяющихся пятен, но и других недостатков печати, имеющих достаточно выраженную форму и локализацию и однозначно связанных с неисправностью деталей печатающего механизма. Тем не менее даже такое расширение перечня признаков не позволяет решить задачу идентификации в произвольном случае, поскольку визуально обнаруживаемые дефекты печати возникают только при продолжительной эксплуатации принтера. Как следствие, задача идентификации произвольного лазерного принтера не может быть решена, если метод основывается только на системе каче-

ственных признаков идентифицируемого устройства [6].

В 2000 г. А.В. Гортинский² показал перспективы использования количественных признаков знаковосинтезирующих печатающих устройств при их идентификации. Принципиальная возможность данного подхода обусловлена тем, что в силу конечной точности изготовления и сборки узлов и деталей принтера одноименные детали разных устройств не будут иметь одинаковых размеров, однако их параметры будут находиться в некотором диапазоне допустимых величин (допусков) [7]. В результате печатающее устройство приобретает индивидуальную для каждого экземпляра совокупность отклонений размеров и иных свойств его узлов и деталей от номинальных значений. В процессе эксплуатации детали взаимодействуют между собой и находятся под воздействием агрессивных факторов рабочей среды. Это приводит к их износу, который, не влияя до некоторых пор на работоспособность изделия, в целом придает ему более «яркую» индивидуальность, выделяя его из числа таких же. Именно это свойство было успешно использовано для решения задачи идентификации матричных принтеров.

Чтобы применить подобный подход к идентификации лазерных принтеров, необходимо найти такие измеримые количественные свойства напечатанного на принтере документа, которые являются прямым отображением индивидуальной для конкретного печатающего устройства комбинации свойств его различных деталей. Таким свойством может стать плотность печати, явная неоднородность которой легко выявляется на распечатках³ сплошных заливок, в особенности выполненных

¹ Многофункциональное устройство, совмещающее возможности сканера, принтера и копира.

² Гортинский А.В. Теоретические и методические основы криминалистической диагностики и идентификации компьютерных печатающих устройств матричного типа. Дисс. ... канд. юрид. наук. Саратов, 2000. 294 с.

³ Распечатка (англ. *printout*) – документ на бумажном носителе, полученный в результате печати на принтере текстовой или графической информации из оперативной или долговременной памяти цифрового устройства.

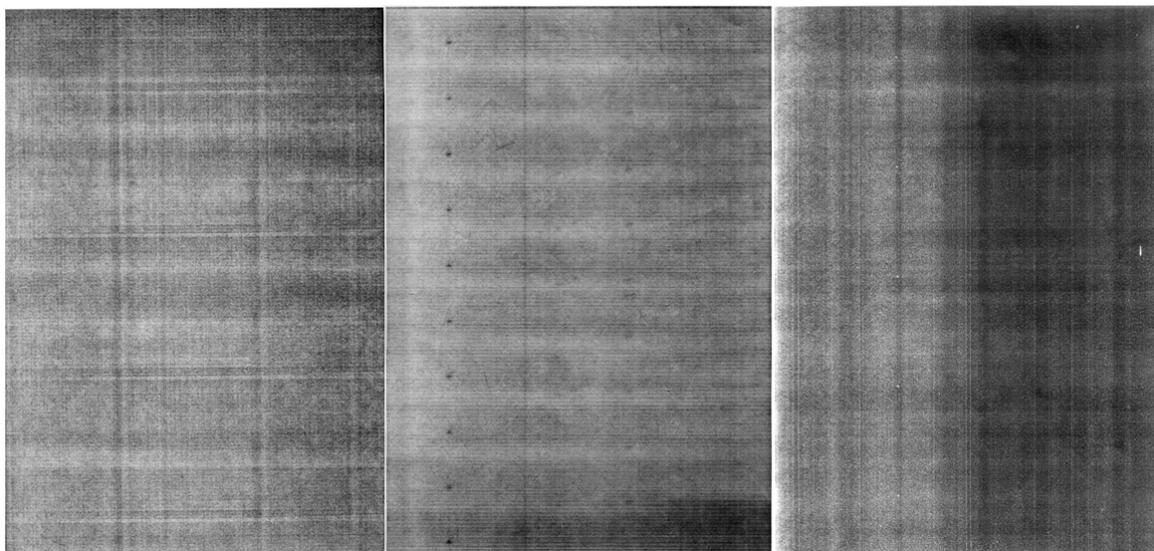


Рис. 1. Результаты печати сплошной заливки на трех различных принтерах
Fig. 1. Results of printing a solid fill on three different printers

на принтерах с картриджами значительно срока эксплуатации (рис. 1).

Таким образом, решение задачи идентификации лазерных принтеров напрямую зависит, с одной стороны, от возможности связать колебания плотности печати с теми или иными свойствами узлов и деталей печатающего устройства, с другой – от возможности дать объективную количественную оценку плотности печати при исследовании произвольного документа.

Цель данной работы – определение возможности количественной оценки колебаний плотности печати на лазерных принтерах для их последующей идентификации. Задачи исследования: выявление зависимости между колебаниями плотности печати и свойствами узлов и деталей печатающего устройства; оценка значимости количественных характеристик плотности печати для идентификации устройства.

Принцип работы лазерного принтера и основные дефекты печати

Лазерные принтеры – одна из разновидностей электрофотографических печатающих устройств. Основным узел таких устройств – это фоторецептор, обычно в форме цилиндра (фотобарабан); его поверхность покрыта слоем вещества, способного воспринимать и удерживать электрический заряд и терять его под воздействием оптического излучения. Данное воздействие приводит к образованию на поверхности фоторецептора участков с различным зарядом, таким образом на по-

верхности формируется скрытое электростатическое изображение.

Главное отличие лазерных принтеров от аналоговых электрофотографических устройств⁴ заключается в том, что источником оптического излучения в них является оптический квантовый генератор (лазер), формирующий узконаправленный поток монохромного излучения. Механизмы развертки лазерного луча и модуляции интенсивности излучения позволяют построчно формировать на фоторецепторе скрытое изображение.

Среди монохромных печатающих устройств наибольшее распространение получили устройства, реализующие принцип электрофотографической печати с негативной магнитной системой проявления. В их число входят принтеры, выпускаемые компаниями Hewlett-Packard, Canon и Xerox. Основные элементы конструкции такого вида устройств [8] показаны на рисунке 2.

Цикл их работы состоит из следующих этапов.

1. На вал заряда подается переменное напряжение с отрицательным смещением, за счет постоянной составляющей которой поверхность фотобарабана приобретает равномерный отрицательный заряд.

2. Луч лазера засвечивает необходимые участки барабана, в результате они теряют отрицательный заряд, а на поверхности фо-

⁴ В современных копировальных устройствах и МФУ скрытое изображение так же формируется лучом лазера, что позволяет считать лазерный принтер частью таких устройств.

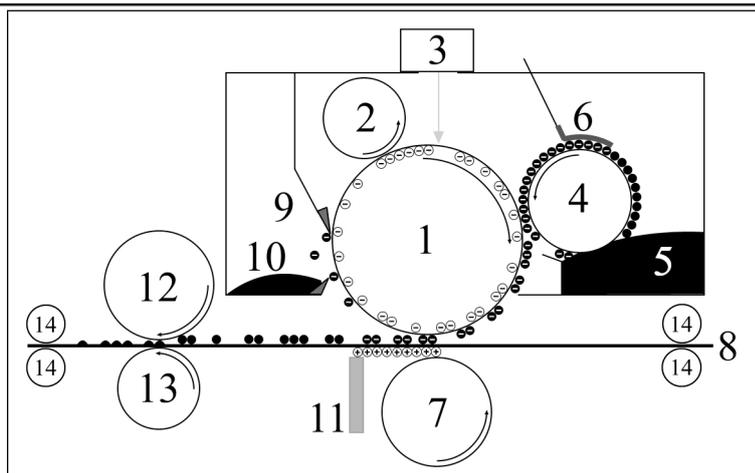


Рис. 2. Общая схема лазерного принтера с негативной магнитной системой проявления

- | | | | |
|---------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 – фотобарабан | 5 – бункер с тонером | 9 – ракель | 13 – прижимной вал |
| 2 – вал заряда | 6 – дозирующее лезвие | 10 – бункер с отработкой | 14 – валы подачи бумаги |
| 3 – лазерный сканер | 7 – вал переноса | 11 – элиминатор | |
| 4 – вал проявки | 8 – лист бумаги | 12 – нагревательный вал | |

Fig. 2. General scheme of a laser printer with a negative magnetic development system

- | | | | |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 – photodrum | 5 – toner hopper | 9 – wiper blade | 13 – lower fuser roller |
| 2 – primary charge roller | 6 – doctor blade | 10 – waste toner hopper | 14 – paper feed rollers |
| 3 – laser scanner | 7 – transfer charge roller | 11 – eliminator | |
| 4 – developer roller | 8 – paper | 12 – upper fuser roller | |

тобарабана формируется невидимое электростатическое изображение.

3. Магнитный вал проявки захватывает тонер из бункера; дозирующее лезвие выравнивает слой тонера на поверхности вала. За счет трения о дозирующее лезвие частицы тонера приобретают отрицательный заряд. В зоне проявки они образуют магнитную кисть, выстраиваясь по силовым линиям магнитного поля, создаваемого неподвижным магнитным сердечником вала проявки, затем прилипают к экспонированным участкам поверхности фотобарабана, не имеющей заряда, и отталкиваются от участков, сохранивших свой заряд. Невидимое изображение на поверхности фотобарабана проявляется, окрашиваясь тонером.

4. На вал переноса подается положительное напряжение, и бумага приобретает положительный заряд. Благодаря этому частицы тонера переносятся с фотобарабана на бумагу.

5. Тонер, оставшийся после переноса на поверхность фотобарабана, счищается с нее ракелем и попадает в бункер отработки.

6. Скрытое электростатическое изображение, оставшееся на поверхности фотобарабана, стирается за счет воздействия переменной составляющей напряжения,

которое подается на вал заряда. Цикл печати завершен.

7. Бумага подается в узел закрепления, который состоит из прижимного вала и нагревателя⁵. Нагреватель расплавляет тонер, который, остывая, закрепляется на поверхности бумаги.

Подробный анализ конструкции деталей принтера и их взаимодействия при печати, а также механизма переноса тонера из бункера на лист бумаги показывает, что все детали печатающего механизма в той или иной степени оказывают влияние на плотность печати, определяемую как количество тонера, поступающего на единицу площади листа. Неоднородность свойств рабочих поверхностей фотобарабана, валов и лезвий, конечная точность их изготовления и сборки усугубляют принципиальную невозможность обеспечить постоянную плотность печати по всей поверхности листа. Износ и загрязнение рабочих деталей в процессе эксплуатации приводят ко все более неравномерной плотности печати в разных частях листа. Это проявляется в первую очередь в виде вертикальных и горизонтальных полос (рис. 1). В полиграфии такой дефект обозначается термином «полошение» [9].

⁵ На рисунке 2 показан нагревающий вал, но возможны и другие конструкции нагревателя.

Из анализа печатающего механизма следует, что причина горизонтального полошения (колебания плотности печати вдоль длинной стороны листа, параллельно направлению движения листа в принтере) – неоднородность свойств рабочих поверхностей фотобарабана и валов печатающего механизма и колебания угловой скорости их вращения [10]. Наиболее заметный вклад в горизонтальное полошение вносят фотобарабан и вал проявки. Поскольку длина окружности валов меньше высоты листа, полосы от одного вала повторяются на листе несколько раз. Это позволяет определить длины окружностей валов, которые соответствуют периоду чередования полос.

Основная причина вертикального полошения (колебания плотности печати вдоль короткой стороны листа, перпендикулярно направлению движения листа в принтере) заключается в неравномерном распределении тонера дозирующим лезвием по поверхности вала проявки. Изменение величины зазора между лезвием и валом проявки, вызванное деформацией, износом и загрязнением лезвия, определяется случайными факторами. Соответственно, рисунок полошения в виде чередующихся вертикальных полос различной ширины и интенсивности уникален и может быть использован в качестве идентификационного признака печатающего устройства.

Материалы и методы

В текстовом редакторе MS Word был подготовлен трехстраничный документ, кото-

рый распечатали на принтерах HP LaserJet 1005, HP LaserJet 1010 (2 шт.), HP LaserJet 1102 (2 шт.), HP LaserJet P2015, Canon LBP 6310 и Kiosera cd1028 в одном экземпляре.

По всей площади первой страницы печатали сплошную черную заливку (рис. 3, слева). При этом лазерный излучатель все время работал с максимальной мощностью, и оптические искажения лазерного сканера не влияли на итоговое изображение.

На второй (рис. 3, центр) и третьей (рис. 3, справа) страницах распечатали текст, набранный шрифтом Courier New глем 12 пт. Выбор моношириной гарнитуры обусловлен простотой выделения в массиве печатного текста строк и столбцов символов, а также отсутствием эффекта «слипания» соседних символов в напечатанном тексте, что характерно для антиквенных шрифтов. Весь текст второй страницы набран одним символом «н», на третьей странице – произвольный текст.

В полиграфии для определения параметров красочного слоя используют измерения оптической плотности. Однако применяемые для этого денситометры приспособлены для единичных измерений. В настоящей работе интерес представляет неравномерность плотности печати по всему листу, при этом определение оптической плотности хотя бы в сотне точек уже крайне трудоемко, а необходимо устанавливать еще и координаты точек измерения.

Поскольку на плотность печати, помимо самого печатающего механизма, оказывают влияние и внешние факторы, такие как



Рис. 3. Тестовый документ

Fig. 3. Test document

температура и влажность воздуха, а также качество используемой для печати бумаги, то результаты точных измерений оптической плотности запечатанных участков документа с помощью денситометра могут различаться и для документов, заведомо напечатанных на одном и том же принтере. В связи с этим, принимая во внимание особенности работы механизма принтера, более существенными будут не точность единичного измерения оптической плотности печати, а отличия между плотностью печати в разных частях листа, которые можно выразить в относительных единицах.

Из этого следует, что необходимости в использовании измерительных приборов нет, но есть основания полагать, что достаточный объем информации об объекте исследования (документе) можно получить из его цифровой фотографии. Так, если рассмотреть отдельный участок документа, который на его изображении отображается единственным пикселем, то очевидно, что яркость пикселя будет находиться в обратной зависимости от количества частиц тонера, располагающихся на этом участке (если тонер не насыпан горкой, что невозможно при нормальных условиях печати). Для цифровых фотографий значения яркости пикселей кодируются числами от 0 до 255 в каждом цветовом канале (либо в единственном канале для полутонового изображения).

Числовое представление яркости дает обширные возможности как для преобразования данных, так и для их статистического анализа. Например, чтобы оперировать не значениями яркости пикселей, а значениями условной плотности тонера, достаточно вычесть значение яркости из 255, что аналогично применению операции инвертирования к изображению. Полученное число будет с некоторой погрешностью пропорционально оптической плотности, зависящей от физического числа частиц тонера на единице площади. Таким образом, цифровая фотография может не только предоставить эксперту возможность запечатлеть объект, но и выступить инструментом его исследования.

Оптимальным устройством для получения цифрового изображения документа, напечатанного на листе формата А4 лазерным принтером с разрешением печати 300–1200 dpi, будет планшетный сканер с матрицей CCD и разрешением 1200–2400 dpi, программное обеспече-

ние которого делает возможным задавать параметры сканирования вручную. В рамках настоящего исследования использовали сканер Epson Perfection 4990 Photo.

Специализированные программы, позволяющие анализировать изображение документа с целью идентификации печатающего устройства, в настоящее время отсутствуют, поэтому для анализа и получения численных данных об изображении используют программу ImageJ, разработанную для научных исследований изображений различных объектов [11]. Она позволяет определять яркость пикселей на выбранной вертикальной или горизонтальной линии. Другой полезной для анализа изображений документов функцией является Analyze Particles. С ее помощью могут быть получены данные о площади печатных элементов.

Статистическую обработку данных можно проводить в программе MS Excel, а для графического представления результатов – использовать как упомянутые ImageJ и MS Excel, так и Advanced Grapher и Surfer. При отсутствии специализированного программного обеспечения наиболее эффективным способом автоматизации процесса анализа изображений, обработки и представления результатов является программирование в среде Matlab, GNU Octave или Python.

Получение и предварительная подготовка изображений

Распечатки сканировали с разрешением 1200 точек на дюйм, для уменьшения объема файла изображения сохраняли как полутоновые (greyscale, 8-bit). Для исключения влияния на результаты сканирования автоматической коррекции изображения использовали линейную тональную кривую. Необходимые настройки программы Epson Scan показаны на рисунке 4, где рамками красного цвета выделены кнопка настройки гистограммы в главном окне и необходимые параметры сканирования.

Изображения сохраняли в формате JPG с минимальным сжатием. Использование других форматов нежелательно из-за большого объема файлов (например, формат BMP), либо в связи с необходимостью задавать масштаб обработке в программе ImageJ (формат TIFF).

Перед исследованием изображения документа необходимо убедиться, что отсутствует наклон изображения, обусловлен-

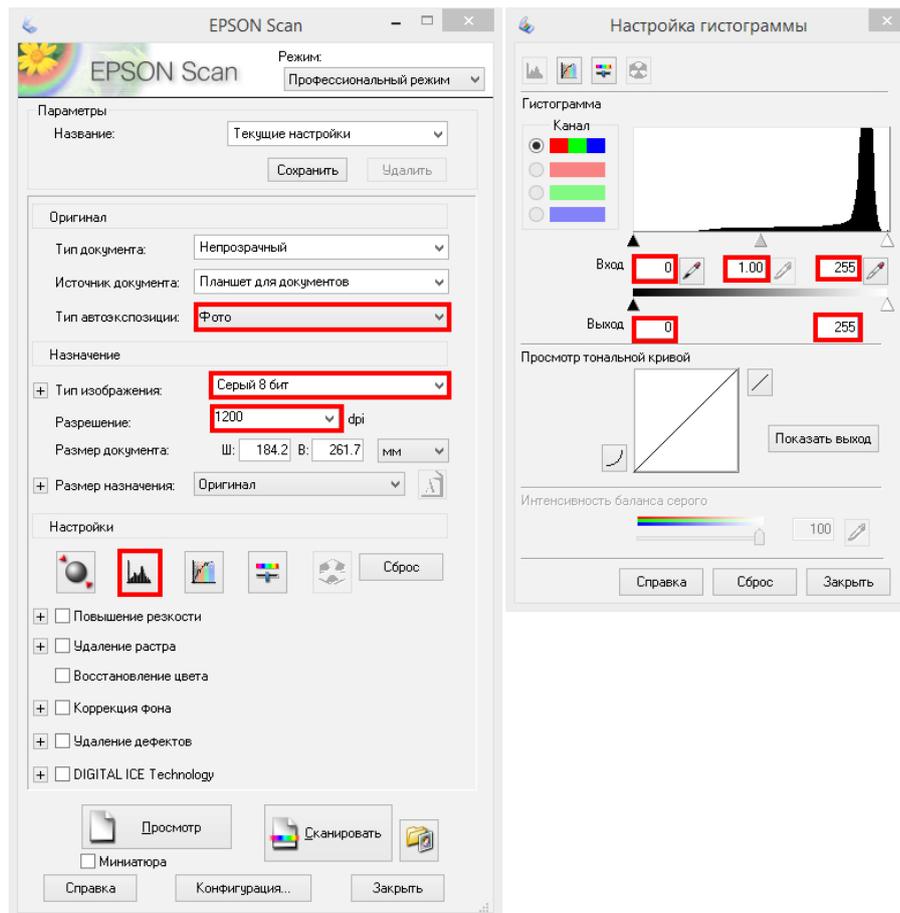


Рис. 4. Настройки программы Epson Scan, использовавшиеся для исследования
Fig. 4. Settings of the “Epson Scan” program used for research

ный перекосом листа при печати или сканировании. Для этого следует открыть файл в ImageJ, выбрать инструмент Rectangle и навести его на точку начала строки или гори-

зонтальной линии. Координаты выбранной точки изображения, отсчитываемые от его левого верхнего угла, отображаются в главном окне (рис. 5).

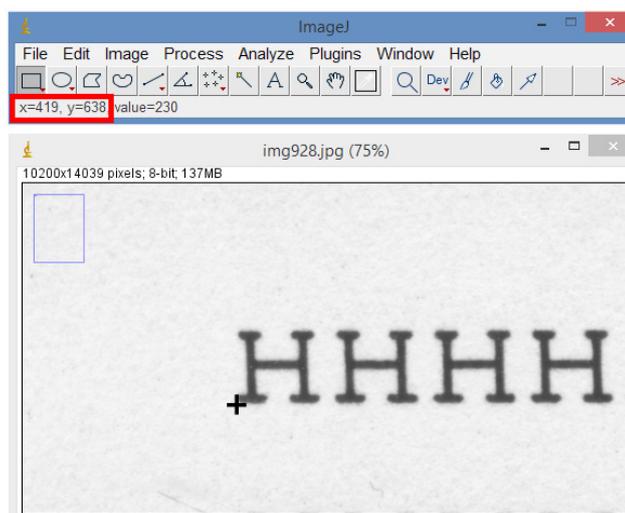


Рис. 5. Отображение координат курсора в главном окне программы ImageJ (выделено красным)
Fig. 5. Displaying the coordinates of the cursor in the main window of the “ImageJ” program (framed in red)

Если начало строки (горизонтальной линии) имеет координаты $X1, Y1$, а окончание – $X2, Y2$, то угол наклона изображения имеет величину:

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \arctg \frac{X2-X1}{Y2-Y1}.$$

Изображение можно повернуть через меню <Image\Transform\Rotate>. Положительное значение угла соответствует повороту по часовой стрелке, отрицательное – против.

Исследование плотности печати

На документах с обширными участками сплошной заливки может визуально наблюдаться как вертикальное, так и горизонтальное полошение (рис. 1). Это позволяет определить его «рисунок» и провести сравнительное исследование, не прибегая к каким-либо дополнительным средствам. Однако сопоставление не самый эффективный способ сравнительного исследования, особенно когда полошение недостаточно выражено. Графики яркости пикселей более информативны при анализе колебаний плотности печати, чем непосредственное визуальное исследование изображений.

Чтобы выявить характер полошения, необходимо определить значения яркости пикселей в направлении, перпендикулярном направлению полос, то есть для вертикального следует определить изменения значений яркости в строках пикселей, для горизонтального – в столбцах. Наиболее

наглядные результаты получаются при рассмотрении экспериментальных распечаток сплошных заливок (первая страница тестового документа).

Для решения поставленной задачи средствами программы ImageJ необходимо (рис. 6) выполнить следующие этапы.

1. Запустить программу ImageJ и открыть исследуемое изображение.
2. Инvertировать изображение с помощью опции меню <Edit\Invert> (на рисунке 6 показано инvertированное изображение сплошной черной заливки), поскольку получаемые с помощью программы графики показывают значения яркости пикселей, а исследуемым параметром является находящаяся в обратной зависимости от яркости плотность печати.
3. Выделить на изображении область интереса (отмечена контуром желтого цвета в окне изображения на рисунке 6) с помощью инструмента Rectangle (первая кнопка на панели инструментов в основном окне программы).
4. Выбрать функцию Plot Profile в меню Analyze в основном окне программы.
5. Нажать кнопку List в открывшемся окне, отображающем график усредненной по столбцам яркости пикселей.
6. Сохранить полученные результаты через меню <File\Save As> или скопировать их в буфер обмена последовательностью команд меню <Edit\Select All>, <Edit\Copy> в открывшемся окне Plot Values.

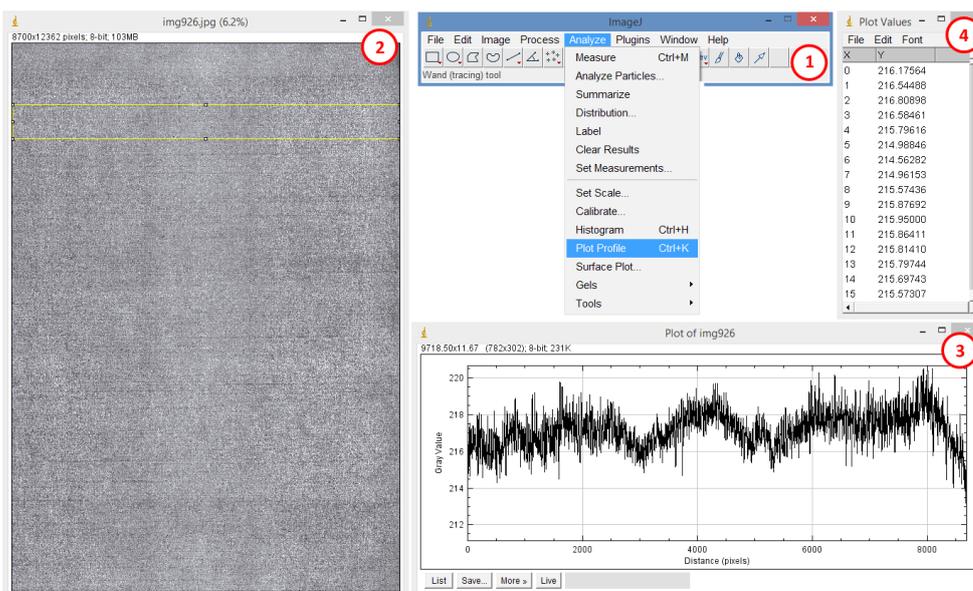


Рис. 6. Определение яркости пикселей изображения в программе ImageJ:

1 – главное окно программы; 2 – окно изображения; 3 – окно графика; 4 – окно значений

Fig. 6. Determination of the brightness of the image pixels in the program "ImageJ": 1 – the main window of the program; 2 – image window; 3 – plot window; 4 – plot values window

Кнопка Live в окне графика позволяет включить интерактивный режим, при котором данные в окнах графика и значений обновляются сразу после изменения выделенной области в окне изображения.

По умолчанию рассчитываются средние значения яркости пикселей в столбцах выделенной области, что позволяет определить колебания плотности печати по горизонтали (вертикальное положение). Для исследования горизонтального положения, проявляющегося как колебания плотности печати по вертикали, необходимо в окне графика нажать кнопку More, выбрать пункт Plot Options и в открывшемся окне отметить опцию Vertical profile. Внесенные изменения настроек активируются при следующем вызове функции Plot Profile через меню главного окна.

Данные из окна Plot Values содержат номер столбца или строки пикселей, отсчитываемый от верхнего левого угла изображения, и среднее значение яркости пикселей в этом столбце (строке). В качестве разделителя целой и дробной части значения яркости используется точка. Если для дальнейшего анализа производится копирование этих данных в MS Excel, ее следует заменить на запятую.

Сравнение графиков, построенных для двух разных документов, позволяет более наглядно показать имеющиеся совпадения

и различия колебаний плотности печати (рис. 7, 8).

Вертикальное положение на сплошной заливке можно сравнить с динамическим следом в трасологии: график плотности печати сплошной заливки выступает аналогом профилограммы следа. При этом так же, как амплитуда колебаний профилограммы, зависит от силы давления следообразующего объекта, амплитуда колебаний графика плотности печати зависит от интенсивности распечатанных заливок. Так, в верхней части рисунка 9 показаны одномасштабные графики плотности печати, полученные на черной, серой и светло-серой заливках, напечатанных одним принтером.

Прямое сопоставление формы одномасштабных графиков может быть затруднительным, но поскольку объектами сравнения являются не изображения, а массивы числовых данных, их можно нормализовать. В настоящей работе нормализация данных выполнялась средствами программы MS Excel и включала следующие операции.

1. Копирование результатов из окна Plot Values программы ImageJ на лист MS Excel.
2. Замена точек, разделяющих целые и дробные части чисел, на запятые.
3. Удаление значений, соответствующих неокрашенным краям изображения,

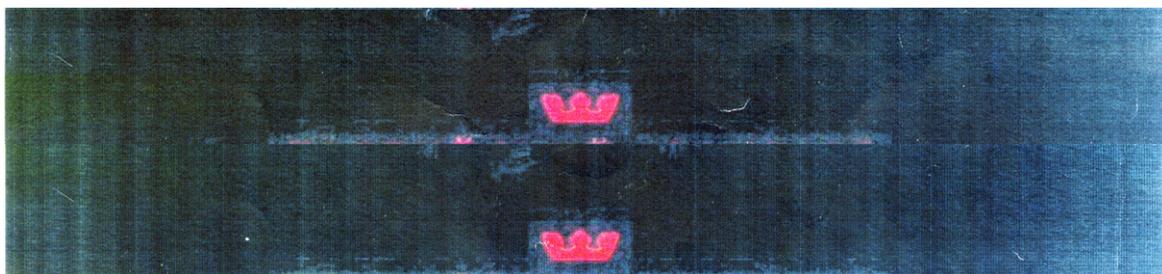


Рис. 7. Сопоставление фрагментов изображений двух разных документов
Fig. 7. Comparison of fragments of images of two different documents



Рис. 8. Сопоставление графиков поперечной плотности печати документов, показанных на рисунке 5

Fig. 8. Comparison of the graphs of the transverse printing density of documents shown in fig. 5

учет которых в дальнейших расчетах приводит к искажению результатов.

4. Вычисление среднего значения плотности печати.

5. Деление всех значений плотности печати на среднее.

По неизменным координатам и нормализованным к среднему значениям плотности печати строят графики, которые показывают совпадения и различия распределения плотности печати более наглядно, чем графики, построенные по исходным данным (рис. 9, внизу).

Наряду с наглядностью представления результатов, преимуществом численных данных является возможность их статистического анализа. Таким образом, если исследовать горизонтальное положение, можно получить график, аналогичный приведенному на рисунке 10, где имеется несколько похожих по форме участков, что явно указывает на наличие повторяющихся особенностей.

Как было указано выше, горизонтальное положение является результатом воздействия валов печатающего механизма, поэтому можно предполагать, что некоторые из этих повторяющихся особенностей имеют характерные размеры, равные длине окружности валов.

Вопросам исследования горизонтального положения⁶ посвящен ряд публикаций зарубежных авторов [12, 13], где колебания яркости изображения рассматриваются как пространственный сигнал, содержащий гармоники, длины волн которых равны длинам окружностей валов печатающего механизма и величине шага зубьев шестерен передачи. Для выявления периодических компонент в таком сигнале предлагается использовать преобразование Фурье. Результатом преобразования является спектр, который показывает амплитуды и длины волн колебаний, имеющихся в исследуемом сигнале.

⁶ Англ. *banding*.

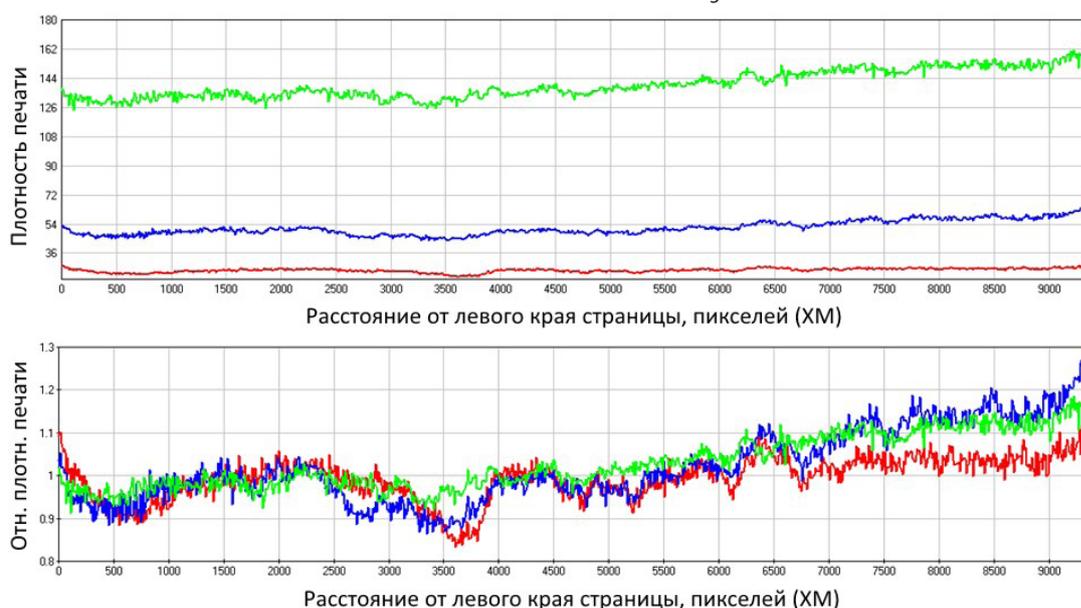


Рис. 9. Одномасштабные и нормализованные графики плотности печати заливок разной интенсивности

Fig. 9. Single-scale and normalized graphs of printing density of fills with different intensities

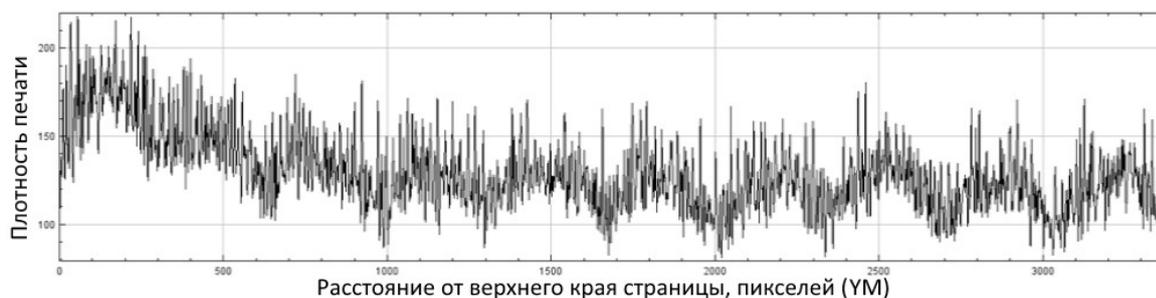


Рис. 10. График продольной плотности печати сплошной заливки

Fig. 10. Graph of longitudinal density of solid fill printing

В ходе настоящего исследования с помощью программы Matlab проводили спектральный анализ графиков продольной плотности печати сплошных заливок и полутоновых изображений, напечатанных на различных принтерах.

В результате установили, что на всех полученных спектрах выделяются гармоники с длинами волн от нескольких единиц до десятков миллиметров. Например, на спектре (рис. 11) выделяются гармоники с длинами волн 72, 48 и 32 мм, которые с некоторой погрешностью соответствуют длине окружности фотобарабана, магнитного вала и вала заряда принтера, на котором была напечатана исследуемая сплошная заливка.

На распечатках, полученных с помощью принтеров с фотобарабанами большого диаметра, точность спектрального анализа в длинноволновой части заметно снижается. Это связано с тем, что за время печати листа фотобарабан успевает совершить только 2–3 оборота. В коротковолновой части спектра во всех случаях гармоники выделяются с высокой точностью, поэтому при наличии сведений об основных параметрах шестерен зубчатых передач появляется теоретическая возможность определить марку и модель принтера, на котором напечатан исследуемый документ, а в случае существенных дефектов зубчатой передачи – идентифицировать конкретное устройство. Представляется, что спектральный анализ горизонтальных колебаний плотности печати является одним из перспективных методов исследования сплошных заливок и полутоновых изображений, а исследование

изменений плотности печати сплошных заливок в продольном и поперечном направлении позволяет получить сведения, которые могут иметь важное значение как для групповой, так и для индивидуальной идентификации лазерных принтеров.

Исследование площади одноименных печатных элементов

Приведенный выше метод определения плотности печати невозможно применить к текстовым документам, которые на практике встречаются намного чаще, чем документы, имеющие протяженные участки сплошных заливок. Для анализа плотности печати на текстовых массивах необходимо усреднять значения яркости только тех пикселей, которые формируют изображение печатных элементов.

Достоинством предложенного П.В. Зотовым и В.М. Зотовым [14] метода является возможность без какой-либо дополнительной подготовки исследовать массивы текста, набранные шрифтами различных начертаний и размеров. Но поскольку выбранный авторами алгоритм фактически сводится к преобразованию массива текста в сплошную заливку, данный метод обладает теми же недостатками, что и непосредственное визуальное сравнение сплошных заливок.

В ряде тематических работ отмечается, что изображения одинаковых печатных элементов, напечатанных на лазерном принтере в разных частях листа, претерпевают различные искажения, включая изменения их пропорций и площади [15, 16].

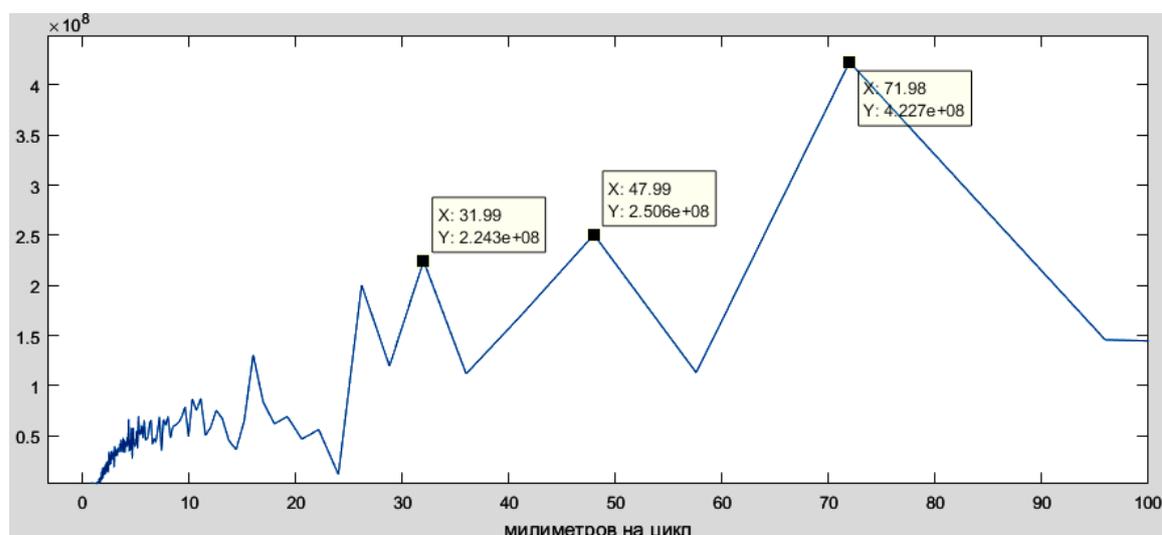


Рис. 11. Спектр Фурье графика продольной плотности печати
Fig. 11. Fourier spectrum of the longitudinal print density graph

В статье Дж. Чана (J.S. Tchan) приведены данные о результатах измерений площади символов [16]. Используемый автором способ измерений имеет высокую точность, однако требует больших временных затрат, в связи с чем в ходе исследования определялась площадь только отдельных символов в разных частях листа.

Если пожертвовать точностью определения площади символов, можно использовать более простые средства и методы, что позволит определить площадь большого числа символов и более наглядно представить полученные результаты. Такое исследование было проведено в рамках настоящей работы. В качестве объекта использовали текст второй страницы тестового документа (рис. 1). Использование в массиве текста единственного символа позволяет проводить непосредственное сравнение

полученных результатов без их дополнительной статистической обработки.

При использовании программы ImageJ для вычисления площади символов необходимо выполнить следующие операции.

1. Запустить программу и открыть исследуемое изображение.

2. Воспользовавшись меню <Image\Adjust\Threshold>, в окне Threshold определить порог бинаризации⁷, применить операцию к открытому изображению, нажав кнопку Apply (рис. 12).

3. Воспользовавшись меню <Analyze\Set Measurements>, в окне Set Measurements выбрать вычисляемые параметры Area и Center of mass (рис. 13).

⁷ Корректные результаты в большинстве случаев достигаются при использовании порога, рассчитанного программой автоматически.

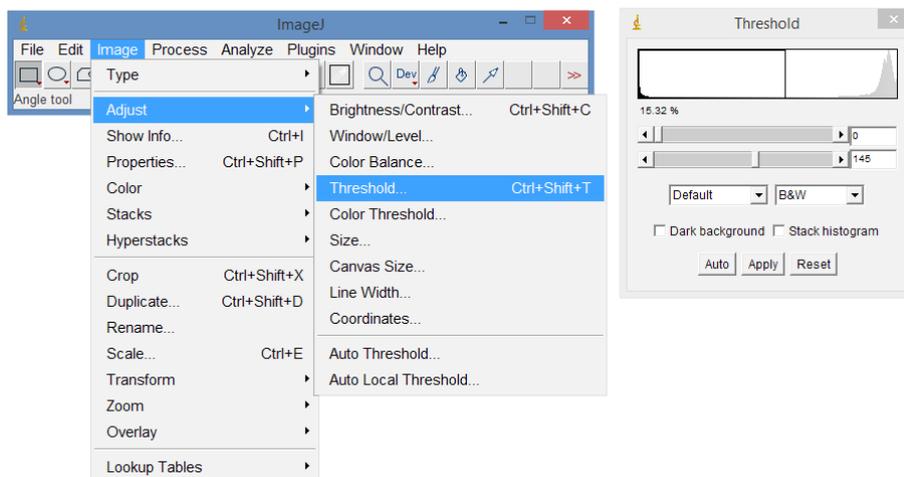


Рис. 12. Меню Image программы ImageJ и окно <Threshold>
Fig. 12. Menu “Image” of the program “ImageJ” and the window “Threshold”

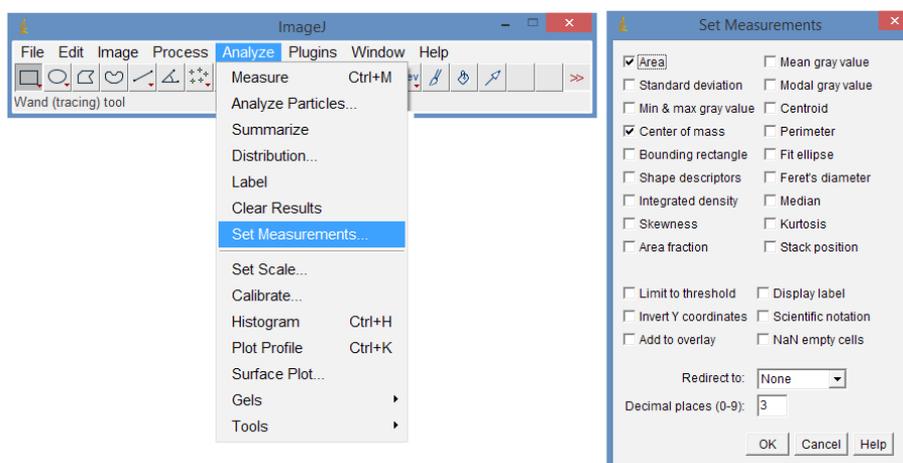


Рис. 13. Меню Analyze программы ImageJ и окно Set Measurements
Fig. 13. ImageJ “Analyze” menu and “Set Measurements” window

4. В окне изображения с помощью инструмента Rectangle выделить область интереса (рис. 14).

5. Воспользовавшись меню <Analyze> <Analyze Particles>, в окне Analyze Particles задать минимальный и максимальный размеры анализируемых фигур, выбрать опцию Display results (рис. 15).

6. После подтверждения настроек в окне Analyze Particles вычисления выполняются автоматически, результаты, представленные в окне Results, можно сохранить через

меню <File\Save As> или скопировать в буфер обмена последовательностью команд меню <Edit>Select All>, <Edit\Copy>.

Скопировав полученные результаты на лист MS Excel и заменив разделители целой и дробной части чисел, по данным третьего (XM) и второго (Area) столбцов можно построить график зависимости площади символа от его расположения в строке. Такие графики для первых трех строк текста показаны на рисунке 16, для всех 44 строк тестовой страницы – на рисунке 17.



Рис. 14. Окно изображения, в котором выделена отмеченная желтой рамкой область интереса – строка символов

Fig. 14. Image window, in which the area of interest was framed in yellow – a string of characters

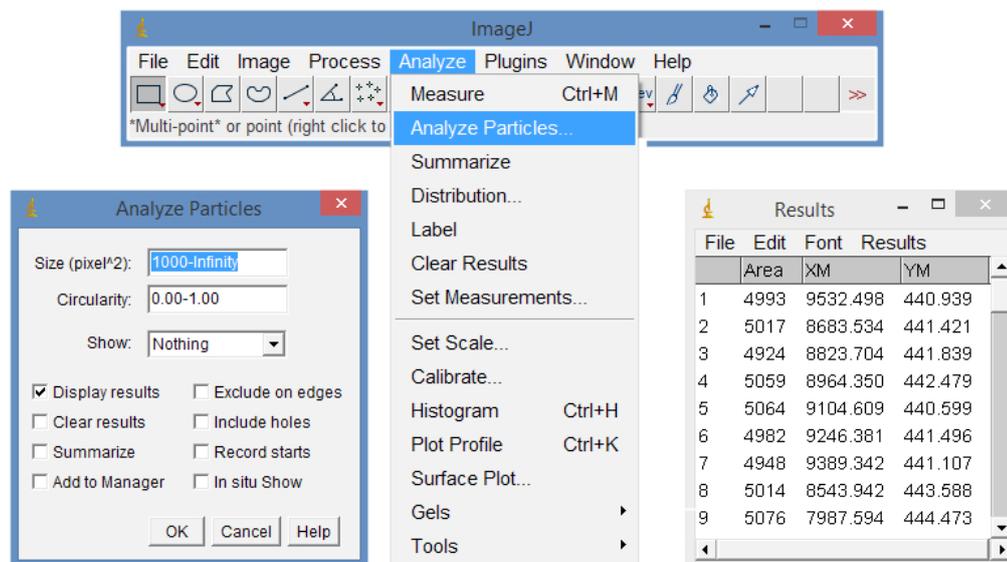


Рис. 15. Меню Analyze программы ImageJ, окна Analyze Particles и Results

Fig. 15. ImageJ “Analyze” menu, “Analyze Particles” and “Results” windows



Рис. 16. График распределения площадей трех строк одноименных символов

Fig. 16. Graph of distribution of areas of three lines of symbols of the same name

Совмещение точечного графика распределения площадей одноименных символов и нормализованного графика поперечной плотности печати, полученного на распечатке сплошной заливки, выполненной на том же принтере, показывает очевидную корреляцию между площадью символов и плотностью печати сплошной заливки. Это позволяет предполагать, что наблюдаемые колебания плотности печати сплошной заливки и площади печатных элементов имеют общие причины.

Значения площади символов группируются в отдельные столбцы, имеющие совпадающие или близкие значения координаты ХМ (рис. 17). Источником значений площади в каждом из этих столбцов являются столбцы символов в массиве текста. Такое выраженное разделение значений по столбцам характерно только для текстов, набранных моноширинным шрифтом. Значения площади в каждом из столбцов графика различаются на 10–15 %, разница между минимальным и максимальным значениями площади может составлять 20–25 %, в результате чего все полученное распределение приобретает вид волни-

стой полосы. Исходя из характера влияния, оказываемого деталями принтера на распределение тонера, можно полагать, что высота этих столбцов и ширина полосы в целом зависят от неоднородности свойств, интенсивности износа и загрязнения поверхности фотобарабана и валов печатающего механизма, а расположение, ширина и амплитуда «волн» в значительной степени – от величины зазора между валом проявки и дозирующим лезвием.

Сравнение распределений для текстов, напечатанных на принтерах одной модели, показывает, что влияние конкретной конструкции принтера и картриджа на форму распределения трудно- или вовсе неразличимо на фоне влияния, которое оказывают на нее неоднородность свойств, износ и загрязнение деталей печатающего механизма (рис. 18).

Для исследования колебаний площади символов в продольном направлении график распределения необходимо строить по данным четвертого (УМ) и второго (Area) столбцов данных (рис. 19).

На графиках продольного распределения наблюдается явная периодичность ко-

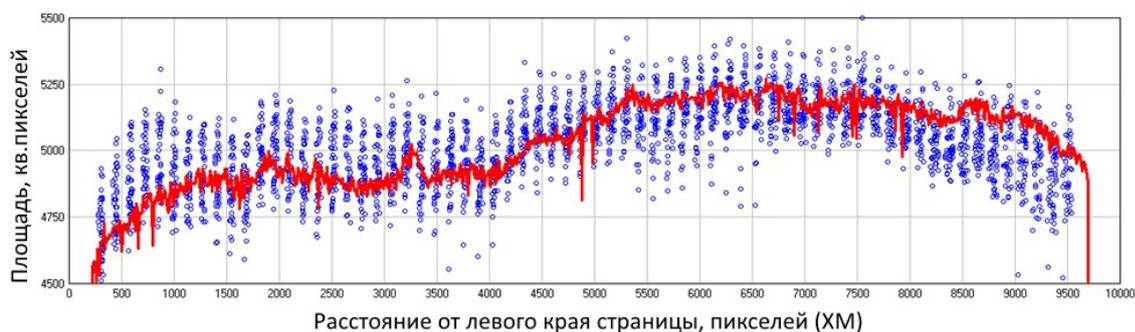


Рис. 17. Совмещение точечного графика распределения площадей одноименных символов в 44 строках документа и нормализованного графика плотности сплошной заливки, напечатанной тем же принтером

Fig. 17. Combination of the dot plot of the distribution of the areas of the same characters in 44 lines of a document and the normalized plot of the density of the solid fill printed by the same printer

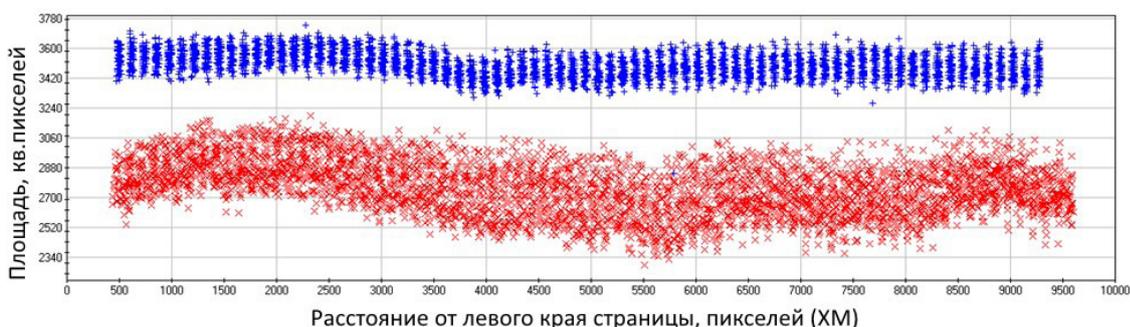


Рис. 18. Графики распределения площадей символов в документах, напечатанных на двух различных принтерах HP LaserJet 1102, имеющих различный износ

Fig. 18. Plot of the distribution of the areas of characters for documents printed on two different HP LaserJet 1102 printers with varying wear

лебаний полос распределения. Принимая во внимание «длину волны» этих колебаний, можно сделать вывод, что основной вклад в колебания вносят фотобарабаны принтеров.

Анализ работы механизма печатающего устройства позволяет предположить, что по мере его износа увеличивается неоднородность свойств поверхности фотобарабана, и уменьшается ее общая способность удерживать тонер. Это должно приводить к увеличению ширины полосы распределения (за счет неоднородности свойств фотобарабана) и снижению ее среднего уровня (за счет уменьшения площади символов). На графиках (рис. 18 и 19) распределение, соответствующее более изношенному принтеру, имеет большую ширину и расположено ниже, что не противоречит выдвинутой гипотезе. Вместе с тем для ее подтверждения необходим более детальный анализ изменений на протяжении всего срока эксплуатации картриджа.

Используя обе координаты символов, средствами программ Matlab или Surfer

можно построить графики распределения площадей в виде контурных диаграмм, где для каждой точки, координаты которой соответствуют координатам центра масс символа, цвет определяется площадью этого символа, а цвет промежуточных точек вычисляется методом интерполяции. В качестве примера таких контурных диаграмм на рисунке 20 показаны диаграммы, построенные по тем же данным, что и графики на рисунках 18 и 19.

Исследование графиков распределения площадей символов в документах, напечатанных на разных принтерах, показывает, что высота расположения, ширина и форма полос продольного и поперечного распределений образуют совокупность признаков печатающего устройства, обладающую достаточно высокой степенью индивидуальности (рис. 21), что позволяет использовать данные признаки как для дифференциации, так и для идентификации печатающих устройств.

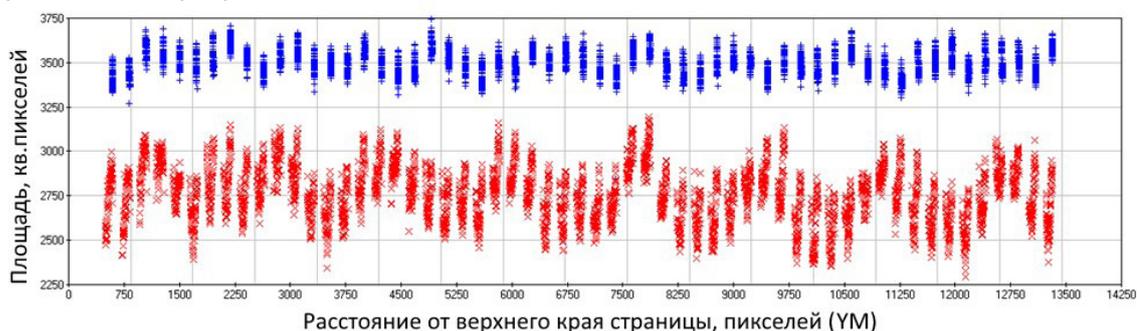


Рис. 19. Графики распределения площадей символов в документах, напечатанных на двух различных принтерах HP LaserJet 1102, имеющих различный износ
Fig. 19. Plot of the distribution of the areas of characters for documents printed on two different HP LaserJet 1102 printers with varying wear

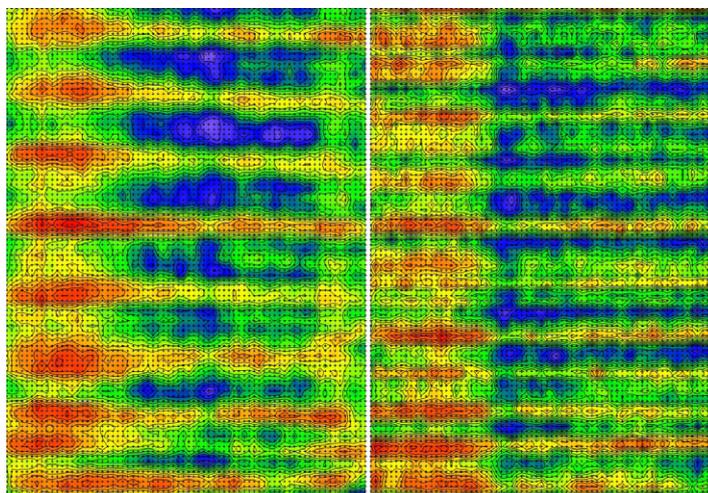


Рис. 20. Контурные диаграммы площади символов для двух принтеров HP LaserJet 1102
Fig. 20. Contour plots of the area of symbols for two HP LaserJet 1102 printers

Исследование площади произвольных печатных элементов

В отличие от использованных в исследовании экспериментальных текстов, реальные документы содержат все символы алфавита и цифры. Очевидно, что площади этих символов сильно отличаются, что необходимо учитывать при построении распределения. Возможным решением будет использование не абсолютной, а относительной площади символа.

Предположим, что в массиве текста, набранного шрифтом одного начертания и размера, имеется n символов «а». Обозначим площадь произвольного символа a_i как S_i , где i – порядковый номер символа в последовательности одноименных, принимающий значение от 1 до n . Тогда среднее значение площади символов «а» можно вычислить по формуле:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i.$$

Введем понятие относительной площади символа, определяемой как

$$\hat{S}_i = S_i / \bar{S}.$$

Если значение S_i показывает абсолютную площадь символа, выраженную в кв. пикселях, то S_i определяет, во сколько раз

площадь этого символа отличается от ее среднего значения.

График поперечного распределения относительной площади символов, построенный для второй страницы тестового документа (рис. 22), ничем, кроме значений вертикальной оси, не отличается от графика, показанного на рисунке 17.

Чтобы построить такой график для произвольного текста, необходимо сначала вычислить \bar{S} для каждой совокупности одноименных символов, а затем S_i для каждого символа этой совокупности. Выделение совокупностей одноименных символов и расчет их относительных площадей вручную достаточно трудоемок. Однако отработанный алгоритм и некоторые технические приемы позволяют выполнить эти действия в обозримые сроки.

Исследование выполняется поэтапно: от наиболее частотных букв алфавита к менее частотным. Частотность букв русского алфавита [17] приведена в таблице.

Наиболее целесообразно проводить исследование в следующем порядке.

1. Открыть в графическом редакторе цифровую фотографию документа и удалить изображения всех символов, кроме исследуемого на данном этапе (например, строчная «о»), сохранить результат в отдельном файле (рис. 23).

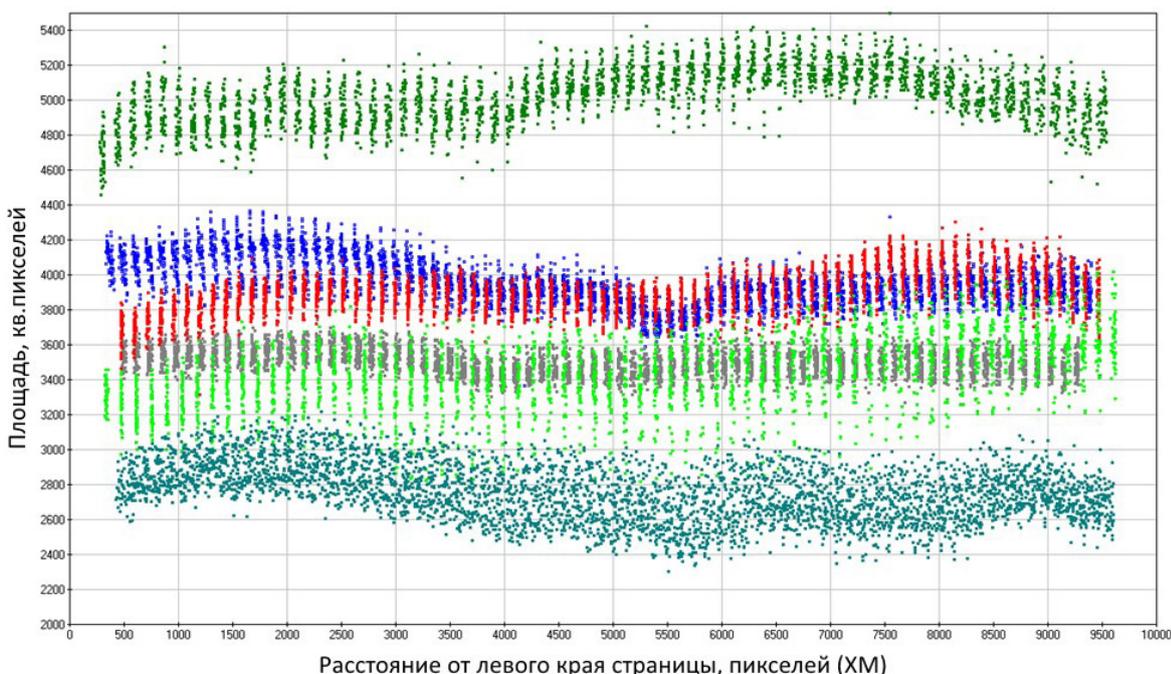


Рис. 21. Графики распределения площадей символов в документах, напечатанных на 6 различных принтерах

Fig. 21. Graphs of the distribution of areas of characters in documents printed on 6 different printers

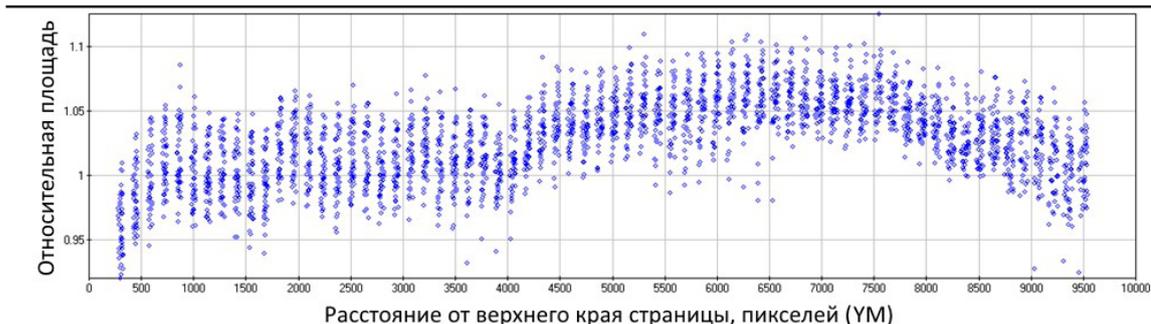


Рис. 22. Точечный график распределения относительных площадей одноименных символов в 44 строках документа

Fig. 22. Dot plot of the distribution of the areas of the same characters in 44 lines of the document

Таблица. Частотность букв русского алфавита (по данным Национального корпуса русского языка)
Table. The frequency of the letters of the Russian alphabet (according to the data of the National Corpus of the Russian Language)

Номер по частоте употребления	Буква	Частотность	Номер по частоте употребления	Буква	Частотность	Номер по частоте употребления	Буква	Частотность
1	о	0,10983	12	м	0,03203	23	й	0,01208
2	е	0,08483	13	д	0,02977	24	х	0,00966
3	а	0,07998	14	п	0,02804	25	ж	0,0094
4	и	0,07367	15	у	0,02615	26	ш	0,00718
5	н	0,067	16	я	0,02001	27	ю	0,00639
6	т	0,06318	17	ы	0,01898	28	ц	0,00486
7	с	0,05473	18	ь	0,01735	29	щ	0,00361
8	р	0,04746	19	г	0,01687	30	э	0,00331
9	в	0,04533	20	з	0,01641	31	ф	0,00267
10	л	0,04343	21	б	0,01592	32	ъ	0,00037
11	к	0,03486	22	ч	0,0145	33	ё	0,00013

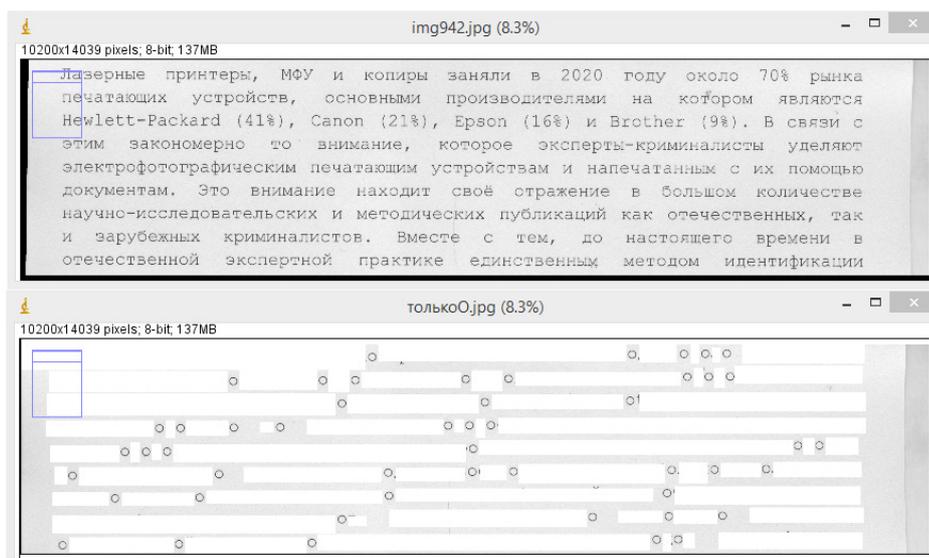


Рис. 23. Изображение исходного документа и отредактированное изображение, из которого удалены все символы, кроме анализируемого

Fig. 23. The image of the original document and the edited image, from which all characters have been removed, except for the analyzed one

2. Открыть полученный файл в программе ImageJ и определить площади символов, как описано в предыдущем разделе.

3. Скопировать полученные данные в MS Excel, вычислить среднюю площадь символов, затем, используя формулы и ссылки на постоянные ячейки, сформировать столбец значений относительной площади.

4. Скопировать значения координат и относительных площадей на отдельный лист.

5. Построить график распределения площадей (рис. 24).

6. В случае, если полученный график недостаточно полно описывает форму распределения, перейти к следующей по частоте букве, выполнить пункты 1–3, добавить полученные значения координат и относительных площадей на лист с предыдущими результатами, вновь построить график.

Прописные буквы и цифры, встречающиеся реже всего, целесообразно обрабатывать в последнюю очередь. Для того чтобы распределение было статистически более представительным, буквы «е» и «ё», «и» и «й» можно объединить в единый массив. Диакритические знаки не будут учитываться при вычислении площади, если правильно подобрать значение нижней границы параметра Size (рис. 15). Символы, встречающиеся на странице менее 5 раз, можно не анализировать.

После вычисления относительной площади достаточного количества символов можно построить итоговый график распределения относительных площадей (рис. 25).

Сравнение графиков распределения абсолютных (рис. 17) и относительных (рис. 25) площадей показывает, что форма распределений с достаточной точностью совпадает, а значит, выбранная схема нормализации работоспособна, и полученное распределение так же, как и описанное в предыдущем разделе, можно использовать для идентификации или дифференциации принтеров.

Некоторым недостатком сравнения относительных площадей является то, что из сравнительного исследования «выпадает» абсолютная площадь символов. Как видно из рисунка 21, площадь одноименных символов, напечатанных на разных принтерах, может сильно различаться. При сравнении относительных площадей символов, напечатанных на разных принтерах, графики будут различаться по форме полосы распределения и, возможно, по ее ширине, но не по высоте. Для того чтобы учесть и этот признак, помимо сопоставления значений относительных площадей разных символов, целесообразно проводить и сравнение значений абсолютных площадей одноименных символов.

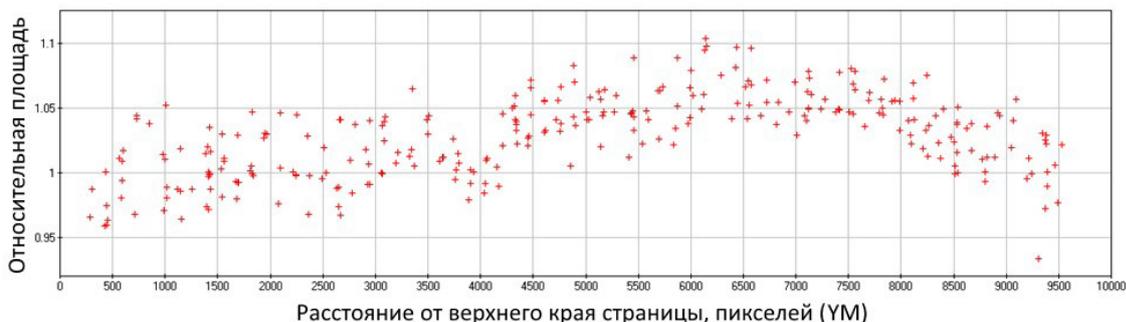


Рис. 24. Точечный график распределения относительных площадей символов «o» в документе
Fig. 24. Dot plot of the distribution of the relative areas of the "o" symbols in the document

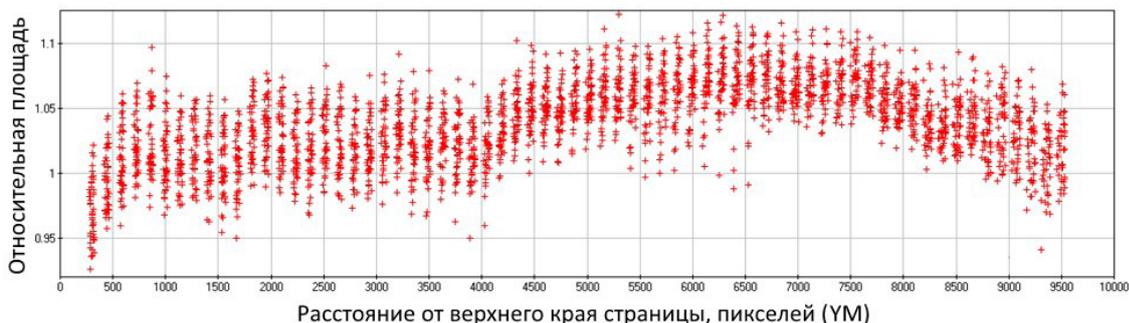


Рис. 25. Точечный график распределения относительных площадей всех символов в документе
Fig. 25. Dot plot of the distribution of the relative areas of all the symbols in the document

Выводы

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Плотность печати на лазерных принтерах неоднородна по листу и определяется групповыми и индивидуальными особенностями печатающего механизма принтера.

2. Площадь символов текста коррелирует с плотностью печати.

3. Анализ формы распределения плотности печати и формы распределения площади символов по странице позволяют вы-

явить индивидуальные особенности печатающего механизма принтера.

4. Для выявления указанных признаков печатающего устройства могут быть использованы доступные технические и программные средства.

Предлагаемые методы исследования достаточно просты в реализации, позволяют получить наглядные результаты и могут способствовать решению задач криминалистической идентификации и дифференциации лазерных принтеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашкин С.Б. Основы судебно-технической экспертизы документов, выполненных с использованием средств полиграфической и оргтехники (теоретический, методологический и прикладной аспекты) / Теория и практика судебной экспертизы. Сборник статей / Составитель А.В. Пахомов. СПб.: Питер, 2003. С. 325–592.
2. Стариков Е.В., Белоусов А.Г., Белоусов Г.Г., Кузнецов В.В. Комплексное криминалистическое исследование средств защиты ценных бумаг и денежных билетов. Учебное пособие. М.: ГУ ЭКЦ МВД России, 2002. 64 с.
3. LaPorte G.M. The Use of an Electrostatic Detection Device to Identify Individual and Class Characteristics on Documents Produced by Printers and Copiers – A Preliminary Study // Journal of Forensic Sciences. 2004. Vol. 49. Issue 3. P. 610–620. <https://doi.org/10.1520/JFS2003307>
4. Четверкин П.А., Ефименко А.В. Идентификация средств оргтехники по следам бумагопроводящих механизмов // Теория и практика судебной экспертизы. 2015. № 3 (39). С. 89–98.
5. Ефименко А.В. Судебно-техническая экспертиза документов, изготовленных с использованием электрофотографических печатающих устройств. Монография. Саратов: СЮИ МВД России, 2010. 180 с.
6. Шведова К.А. Классификации современных способов полиграфической печати (технико-криминалистический аспект) // Судебная экспертиза. 2020. № 4 (64). С. 141–150. <https://doi.org/10.25724/VAMVD.QSTU>
7. Лебедев Л.В., Мнацаканян В.У., Погонин А.А., Схиртладзе А.Г., Тимирязев В.А., Шрубченко И.В. Технология машиностроения. Учебник для вузов. М.: Академия, 2006. 528 с.
8. Печеровый В.В. Профилактика и ремонт МФУ и лазерных принтеров Canon и Hewlett Packard. М.: Ремонт и сервис, 2013. 102 с.
9. Мильчин А.Э. Издательский словарь-справочник. М.: ОЛМА-Пресс, 2003. 560 с.

REFERENCES

1. Shashkin S.B. Fundamentals of the Forensic Document Examination Created with the Use of Printing and Office Equipment (Theoretical, Methodological and Applied Aspects). In: Pakhomov A.V. (ed.). *Theory and Practice of Forensic Examination*. Saint Petersburg: Piter, 2003. P. 325–592. (In Russ.).
2. Starikov E.V., Belousov A.G., Belousov G.G., Kuznetsov V.V. *Comprehensive Forensic Research of Protection Means for Securities and Cash Tickets. Textbook*. Moscow: GU EKTs Ministry of Internal Affairs of Russia, 2002. 64 p. (In Russ.).
3. LaPorte G.M. The Use of an Electrostatic Detection Device to Identify Individual and Class Characteristics on Documents Produced by Printers and Copiers – A Preliminary Study. *Journal of Forensic Sciences*. 2004. Vol. 49. Issue 3. P. 610–620. <https://doi.org/10.1520/JFS2003307>
4. Chetverkin P.A., Efimenko A.V. Identification of Equipment on Traces of Submitting Paper Mechanisms. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2015. No. 3 (39). P. 89–98. (In Russ.).
5. Efimenko A.V. *Forensic Examination of Documents Created Using Electrophotographic Printing Devices. Monograph*. Saratov: SUI MVD Rossii, 2010. 180 p. (In Russ.).
6. Shvedova K.A. Classification of Up-to-date Printing Methods (the Forensic Technical Aspect). *Forensic Examination*. 2020. No. 4 (64). P. 141–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.25724/VAMVD.QSTU>
7. Lebedev L.V., Mnatsakanyan V.U., Pogonin A.A., Skhirtladze A.G., Timiryazev V.A., Shrubchenko I.V. *Mechanical Engineering Technology. Textbook for Universities*. Moscow: Academiya, 2006. 528 p. (In Russ.).
8. Pecherovyi V.V. *Preventive Maintenance and Repair of Canon and Hewlett Packard MFPs and Laser Printers*. Moscow: Remont i servis, 2013. 102 p. (In Russ.).
9. Milchin A.E. *A Publisher's Dictionary and Reference Book*. Moscow: OLMA-Press, 2003. 560 p. (In Russ.).

10. Ewe M.T.S., Chiu G.T.C., Grice J., Allebach J.P., Chan C.S., Foote W. Banding Reduction in Electrophotographic Processes Using Piezoelectric Actuated Laser Beam Deflection Device // *Journal of Imaging Science and Technology*. 2002. Vol. 46. No. 5. P. 433–442.
11. Колюхов А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений. Учебное методическое пособие. Томск: ТУСУР, 2012. 105 с.
12. Chiang P.-J., Khanna N., Mikkilineni A.K., Segovia M.V.O., Suh S., Allebach J.P., Chiu G.T.C., Delp E.J. Printer and Scanner Forensics // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2009. Vol. 26. No. 2. P. 72–83.
<http://doi.org/10.1109/msp.2008.931082>
13. Ali G., Chiang P.-J., Mikkilineni A.K., Allebach J.P., Chiu G.T., Delp E.J. Intrinsic and Extrinsic Signatures for Information Hiding and Secure Printing with Electrophotographic Devices. *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies*. 2003. P. 511–515.
14. Зотов П.В., Зотов В.М. Математическая модель выявления неравномерности распределения тонера электрофотографических печатающих устройств // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2013. № 14 (117). С. 14–18.
15. Wu Y., Kong X. Xin'gang Y., Yiping G. Printer Forensics Based on Page Document's Geometric Distortion / 16th IEEE International Conference on Image Processing (November 7–10, 2009, Cairo, Egypt). 2009. P. 2909–2912.
<http://doi.org/10.1109/ICIP.2009.5413420>
16. Tchan J. Forensic Examination of Laser Printers and Photocopiers Using Digital Image Analysis to Assess Print Characteristics // *Journal of Imaging Science and Technology*. 2007. Vol. 51. No. 4. P. 299–309.
<http://doi.org/10.2352/j.imagingsci.technol>
17. Ляшевская О.Н., Шаров С.А. Частотный словарь современного русского языка на материалах Национального корпуса русского языка. М.: Азбуковник, 2009. 1112 с.
10. Ewe M.T.S., Chiu G.T.C., Grice J., Allebach J.P., Chan C.S., Foote W. Banding Reduction in Electrophotographic Processes Using Piezoelectric Actuated Laser Beam Deflection Device. *Journal of Imaging Science and Technology*. 2002. Vol. 46. No. 5. P. 433–442.
11. Konyukhov A.L. *Guide to Using the ImageJ Software Complex for Image Processing: Handbook*. Tomsk: TUSUR, 2012. 105 p. (In Russ.).
12. Chiang P.J., Khanna N., Mikkilineni A.K., Segovia M.V.O., Suh S., Allebach J.P., Chiu G.T.C., Delp E.J. Printer and Scanner Forensics. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2009. Vol. 26. No. 2. P. 72–83.
<http://doi.org/10.1109/msp.2008.931082>
13. Ali G., Chiang P.-J., Mikkilineni A.K., Allebach J.P., Chiu G.T., Delp E.J. Intrinsic and Extrinsic Signatures for Information Hiding and Secure Printing with Electrophotographic Devices. *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies*. 2003. P. 511–515.
14. Zotov P.V., Zotov V.M. Mathematical Model Revelation of Unevenness Distribution a Toner of Electrophotographic Printers. *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2013. No. 14 (117). P. 14–18. (In Russ.).
15. Wu Y., Kong X. Xin'gang Y., Yiping G. Printer Forensics Based on Page Document's Geometric Distortion. *16th IEEE International Conference on Image Processing* (November 7–10, 2009, Cairo, Egypt). 2009. P. 2909–2912.
<http://doi.org/10.1109/ICIP.2009.5413420>
16. Tchan J. Forensic Examination of Laser Printers and Photocopiers Using Digital Image Analysis to Assess Print Characteristics. *Journal of Imaging Science and Technology*. 2007. Vol. 51. No. 4. P. 299–309.
<http://doi.org/10.2352/j.imagingsci.technol>
17. Lyashevskaya O.N., Sharov S.A. *Frequency Dictionary of the Modern Russian Language Based on the Materials of the National Corpus of the Russian Language*. Moscow: Azbukovnik, 2009. 1112 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Петров Сергей Михайлович – заведующий отделом криминалистических экспертиз Калининградской лаборатории судебной экспертизы Министерства юстиции Российской Федерации; e-mail: pruss@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Petrov Sergei Mikhailovich – Head of the Forensic Examination Department of Kaliningrad Laboratory of Forensic Science of the Ministry of Justice of the Russian Federation; e-mail: pruss@mail.ru

Статья поступила: 26.02.2021

После доработки: 20.04.2021

Принята к печати: 12.05.2021

Received: February 26, 2021

Revised: April 20, 2021

Accepted: May 12, 2021