

DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-4-24-32

УДК 676.017.55:535.34

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БУМАГ ДЛЯ ПОЛИГРАФИИ

М. А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ⁺, И. В. МАРЧЕНКО, О. П. СТАРЧЕНКО, С. В. НЕСТЕРОВА

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

Цель работы — исследование и сравнение ряда статистических показателей неоднородности бумаги.

Для оценки показателя просвет бумаги, который характеризует неравномерное распределение волокнистых компонентов и минеральных наполнителей в структуре бумаги, в качестве альтернативы использования приборов «Lorentzen & Wettre TSO-tester» и оптического анализатора «PTA-Line Formation Tester» предложено применить цифровой микроскоп, работающий в проходящем свете.

Рассмотрена модель неоднородности на примере модели «шахматная доска». Использование показателя фрактальная размерность неудовлетворительно описывает характеристику модели. Удовлетворительные результаты получены с использованием энтропии Шенона. Так, например, разброс значений для показателя фрактальная размерность колебался в пределах 1,75–1,93, и соответственно 1,028–1,833 для показателя энтропия Шенона.

Предложены три группы показателей, которые отражают различные стороны неравномерности покрытия поверхности флокулами или промоинами. Первая группа — среднеквадратичное отклонение, размах, количество оттенков серого. Вторая группа — отклонение центра масс от геометрического среднего. Третья группа — энтропия Шенона, количество и/или размер участков, принимаемых за флокулы (промоины).

На примере образцов бумаги класса С — Снегурочка, Svetocopy, Есопоту — с использованием микроскопа «Альтами БИО2» проанализирована однородность образцов этих бумаг. В качестве показателей для анализа были выбраны: среднеквадратичное отклонение яркости, энтропия по Шенону, индекс формования, фрактальная размерность, занятая флокулами площадь, отклонение от геометрического центра масс, количество оттенков серого, разность между максимальным и минимальным значением оттенков серого. Оценена чувствительность этих показателей на выбранных бумагах. Наибольшую чувствительность показал параметр отклонение центра масс от геометрического центра, характеризующийся коэффициентом вариации равным 21,9–43,1%. Значение для вариации среднеквадратичного отклонения яркости составило 12,9–13,1%. Вариации остальных показателей менее значительны.

Результаты работы могут быть использованы для разработки количественного метода оценки неоднородности бумаги.

Ключевые слова: неоднородность бумаги, оптический метод, модель «шахматная доска», классификация показателей неоднородности, устойчивость показателей, офисные бумаги.

ESTIMATION OF THE STABILITY INDICATORS OF UNHOMOGENEITY OF PAPER FOR PRINTING

M. A. ZILBERGLEIT⁺, I. V. MARCHENKO, O. P. STARCHENKO, S. V. NESTEROVA

Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: mazi@list.ru

The purpose of this work is to study and compare a number of statistical indicators of paper heterogeneity.

To assess the paper lumen index, which characterizes the uneven distribution of fibrous components in the structure of paper (cardboard), it was proposed to use a digital microscope as an alternative to using the "Lorentzen & Wettre TSO-tester" devices and the PTA-Line Formation Tester optical analyzer, working in trans-mitted light.

The model of inhomogeneity is considered on the example of the "checkerboard" model. The use of the indicator fractal dimension does not satisfactorily describe the characteristics of the model. Satisfactory results were obtained using the Shannon entropy. So, for example, the scatter of values for the fractal dimension indicator fluctuated within 1.75–1.93, and, accordingly, 1.028–1.833 for the Chenon entropy exponent.

Three groups of indicators have been proposed, which reflect different sides of the unevenness of the surface coverage by floccules or scours. The first group — standard deviation, span, number of shades of gray. The second group is the deviation of the center of mass from the geometric mean. The third group is the Chenon entropy, the number and/or size of areas taken for floccules (gullies).

On the example of paper samples of class C — Snegurochka, Svetocopy, Economy — using the microscope "Altami BIO2" analyzed the heterogeneity of the samples of these papers. The following parameters were chosen for the analysis: standard deviation of brightness, Chenon entropy, molding index, fractal dimension, area occupied by floccules, deviation from the geometric center of mass, number of shades of gray, the difference between the maximum and minimum values of shades of gray. The sensitivity of these indicators on the selected securities is estimated. The greatest sensitivity was shown by the parameter deviation of the center of mass from the geometric center — 21.9–43.1%. The value for the variation of the standard deviation of brightness was 12.9–13.1%. Variations in other indicators are less significant.

The results of the work can be used to develop a quantitative method for evaluating paper heterogeneity.

Keywords: paper unhomogeneity, optical method, "checkerboard" model, classification of indicators of heterogeneity, stability of indicators, office paper.

Введение

Многие дефекты, такие как внешний вид, непрозрачность, потеря прочности, плохая краскопед-редача, относятся к мелким и присутствуют во всех видах бумаги. Причина таких дефектов заключается в неравномерности распределения волокон, как в плоскости, так и по толщине листа бумаги. Достаточно упомянуть, что водная дисперсия волокна, которая поступает на непрерывно движущуюся сетку бумагоделательной машины, неоднородна, подвергается действию турбулентных потоков, осаждение происходит в так называемых стесненных условиях в присутствии пузырьков воздуха.

Современная практика требует оперативного анализа таких дефектов, причём анализ должен быть быстрым и количественным.

При рассмотрении показателей бумаг для полиграфии используют термин — просвет (устаревший — облачность) бумаг. Этот показатель трактуется в стандарте ГОСТ 19088 «Бумага и картон. Термины и определения» как дефект, характеризующийся неравномерным распределением волокнистых компонентов в структуре бумаги (картона), обнаруживаемый при рассмотрении в проходящем свете. Близкое определение приведено в ОСТ 29.42 «Термины и определения дефектов полуфабрикатов и материалов полиграфического производства» — «Распределение композиционных составляющих бумаги, определяемое визуально в проходящем свете и делящееся на ровное, облачное и клочковатое». При этом требования к конкретным видам бумаги формулируются достаточно неопределенно: просвет

бумаги должен быть равномерным и соответствовать просвету образца, согласованного с потребителем.

Таким образом, данный тип свойств относится к дефектам и может быть юридически оспорен. К числу бумаг, для которых оговаривается термин «просвет», относят бумаги, соответствующие следующим нормативным документам: ГОСТ 1339 «Бумага картографическая», ГОСТ 9168 «Бумага для глубокой печати», ГОСТ 9094 «Бумаги для печати офсетная», ГОСТ 7625 «Бумага этикеточная», ГОСТ 20283 «Бумага обложечная», ГОСТ Р 58106 «Бумага для офисной техники», ГОСТ 18510 «Бумага писчая», ГОСТ 8828 «Бумага-основа и бумага двухслойная», ГОСТ 6749 «Бумага-основа для обоев», ГОСТ 23436 «Бумага кабельная для изоляции силовых кабелей», ТУ 5431-042-00279195-2015 «Бумага офсетная «П», ГОСТ 9095 «Бумага для печати типографская».

Проблема, связанная с оценкой просвета, раньше лежала в аппаратной базе. Ещё в 60–90-х годах за рубежом и в СССР предлагали ряд технических решений, которые требовали изготовления соответствующего фотометрического оборудования [1–3]. Если отбросить такой недостаточно корректный и относительно трудоемкий метод, как определение массы метра квадратного для анализа неоднородности, то существует немало приемов исследования просвета. Все они сводятся к фиксации прохождения физического сигнала, чаще всего света, через исследуемый образец бумаги. В принципе, лист бумаги можно сканировать методами гравиметрии, рентгенографии, электронографии, инфракрасной спектроскопии, оптической микро-

скопии, методом ядерного магнитного резонанса, двойного лучепреломления, акустическими, диэлектрическими методами измерения [4].

Утверждают, что техника бета-рентгенографии имеет низкий внутренний разброс и хорошую корреляцию с истинной плотностью массы, но уступает более мягкой рентгенографии, которая имеет более высокое разрешение [5, 6]. Следует отметить, что стоимость оборудования для рентгенографических исследований для таких подходов достаточно велика.

В настоящее время для исследования неоднородности бумаги используются ультразвук с применением «Lorentzen&Wettr TSO-tester», оптический анализатор «PTA-Line Formation Tester» («M.C.E.TEC», Нидерланды) и «PDA.PEA» («EMTEC ELECTRONICS», Германия) анализатор динамической впитываемости. Анализатор «PTA-Line Formation Tester» позволяет получить цифровое изображение участка образца размером 12×12 см в поляризованном проходящем свете.

«PDA.PEA», анализатор динамической впитываемости с модулем оценки неоднородности при печати, предназначен для прогнозирования неоднородности при печати/пятнистости оттиска посредством мультисенсорного измерения поведения жидкостей при смачивании и абсорбции. Оценка общего распределения поверхностных параметров бумаги и картона, относящихся к печатному процессу и касающихся связующих, пор, пигментов, поверхностной проклейки, проводится измерением взаимодействия между тестирующей жидкостью и бумагой с использованием соответствующего сенсорного элемента. Испытание бумаги на впитываемость проводят на линии из 32 сенсорных точек диаметром 1 мм. С момента контакта с жидкостью происходит отражение в z-направлении ультразвуковых сигналов с частотами 2 МГц или 1 МГц.

Ультразвуковой анализатор «Lorentzen&Wettr TSO-tester» позволяет определить ориентацию волокон на бумажном листе, что также, в какой-то степени, отвечает поставленной задаче. Кроме того, такие измерения позволяют контролировать работу бумагоделательной машины в плане контроля над анизотропией.

Простым и недорогим методом анализа просвета является использование стандартного просвечивающего микроскопа с цифровой регистрацией.

В качестве отклика, который используют для оценки просвета, чаще всего рассматривают такие стандартные показатели, как дисперсию, коэффициент вариации. Иногда вносят собственные не описанные в стандартах параметры типа «Индекса формирования», которые определяют как отношение максимума на диаграмме распределения оттенков серого к разнице между максимальной и минимальной яркостью.

Следует отметить наличие специфических методов обработки [7–10], требующих отдельно-

го математического обеспечения. Например, метод Бартлетта, также известный как метод усредненных периодограмм [7, 8], методы, связанные с вейвлет-преобразованием [9, 10], которые в виду их сложности в данном исследовании не рассматриваются.

Доказательств успешности использования этих методов для бумаг не известно. Такие показатели многократно с успехом использовали для описания одномерного массива, например, для оценки шероховатости. Однако для двухмерного массива, характеризующего бумагу, в которой главной является неоднородность в двух перпендикулярных направлениях, такие обоснования отсутствуют.

В некоторых источниках рассматривают возможность применения теории фракталов в описании структурных свойств бумаги [11–16].

Некоторые авторы выражают скептическое отношение к возможности использования технологии обработки данных, связанной с использованием фракталов [17]. Однако какие-либо данные, связанные с проблемой использования фракталов, в работе отсутствуют.

Аналогичное мнение высказано в публикациях [18, 19], где утверждаю, что «исследования фрактального подхода к оценке шероховатости поверхности бумаги (картона) показали невысокую информативность оценки микрогеометрии поверхности различных запечатываемых материалов, характеризующихся разной степенью развитости рельефа поверхности».

Подход с использованием энтропии Шенона упоминают только в работах, связанных с морфологией структур твердых сплавов [20–22]. В работах, связанных с бумагой, энтропию Шенона не используют.

Можно, очевидно, заметить пробел в исследовании неоднородности бумаги, который заключается в том, что существующий картографико-математический анализ неоднородностей, используемый в специальных разделах географии, не нашел применения в бумажной и полиграфической промышленности [23–26].

Большинство работ, связанных с анализом неоднородности листовых материалов, связано с прочностными свойствами этих материалов [27–33].

В то же время в полиграфии гораздо большее значение имеют процессы взаимодействия краски с бумагой. Поэтому обсуждение проблемы неоднородности бумаг должно проводиться с учетом особенности восприятия краски. Неоднородность бумаги связана с особенностями впитывания. При подходе с использованием просвечивания и цифровой фиксации более плотным участкам должны соответствовать более темные области.

Если подвести итог рассмотрению различных методов, связанных с оценкой неоднородности поверхности, то даже формальные исследования на простых моделях распределения типа сгущения флокулы-промоины до сих пор нам неизвестны.

Цель работы — исследование и сравнение ряда статистических показателей неоднородности бумаги.

Материалы и методы исследования

Для измерения свойств бумаги использовался микроскоп «Альтами Био 2» (ООО «АЛЬТАМИ», Россия), позволяющий оцифровывать изображение в проходящем свете. Для обработки результатов использовали программы *ImageJ* и *JMicroVision*, которые предназначены для обработки оптических данных, полученных в цифровых форматах, имеют открытый код и распространяются бесплатно. Достаточно простой интерфейс *JMicroVision* ставит данную программу по некоторым опросам на первое место, однако достаточно сложный функционал *ImageJ* позволяет получить больше информации. Сюда следует отнести возможность 3-х мерной визуализации, автоматизацию обработки стока изображений, возможность конвертации изображений из одного формата в другой, возможность проведения математических операций с цифровыми изображениями. Незначительным недостатком *ImageJ* по сравнению с *JMicroVision* является неудачный вывод некоторых гистограмм. Возможно, одним из недостатков *JMicroVision* является ограничение нижнего предела определения площади, равного 10 квадратным пикселям.

Результаты и их обсуждение

Одномерная модель распределения неоднородностей не годится для описания просвета бумаги. Рассмотрим простой пример. На рис. 1 показано распределение нескольких видов неоднородностей. Эти фигуры имеют совершенно одинаковое соотношение условных сгущений (черный квадрат) и промоин (белый квадрат), однако их распределение на поверхности различно. На практике эта разница принципиальна. При нанесении краски на такую поверхность, состоящую из условных флокул и промоин, переход от первой поверхности к последней должен приводить к улучшению качества восприятия краски.

Очевидно, что восприятие краски бумагой для поверхностей, представленных на рис. 1, разное. В

то же время, такие показатели неоднородности, как среднеквадратичное отклонение или индекс формирования у этих поверхностей одинаковы.

Лучше обстоят дела с использованием энтропии Шенона и показателя фрактальности.

Известно, что фрактальная размерность характеризует геометрическую сложность пространственного объекта [34, 35]. Фрактальная размерность показывает, как плотно и равномерно элементы данного множества заполняют собой пространство. Для линии (или группы линий) на плоскости значение фрактальной размерности D , близкое к 1, означает «гладкость», близкое к 2 — ее сильную извилистость и изрезанность в разных масштабах [36]. В модели, представленной на рис. 1, фрактальная размерность снижается в ряду 1,93; 1,87; 1,79; 1,75; 1,74.

Энтропия Шенона характеризует изменчивость яркости изображения и равна 0 для области с постоянной яркостью и максимальна в случае возрастания флуктуации. Значения энтропии для рассматриваемой модели (рис. 1): 1,028; 1,103; 1,303; 1,751; 1,833. Очевидно, что показатель энтропии Шенона с увеличением количества флокул или промоин лучше отражает изменение в просвете на плоскости, чем фрактальная размерность.

Еще одним показателем, который учитывает неоднородность на плоскости, является количество условных флокул и промоин. Этот показатель достаточно легко рассчитать, однако и при его применении существуют проблемы с интерпретацией. На рис. 2 показаны возможные проблемы. Изображения отличаются лишь наличием соединительных перепонок между промоинами. В результате при переходе от изображения к изображению количество промоин постепенно снижается, в то время как их общая площадь уменьшается крайне незначительно. Определение площади не является проблемой, поэтому, очевидно, имеет смысл контролировать средний диаметр промоин (флокул).

В этой статье мы предлагаем рассмотреть еще один показатель — отклонение от геометрического среднего центра масс системы материальных точек, характерной для неоднородной поверхности. Эти координаты являются пространственными моментами первого порядка. Очевидно, что отсутствие равновесия или, точнее говоря, отклонение

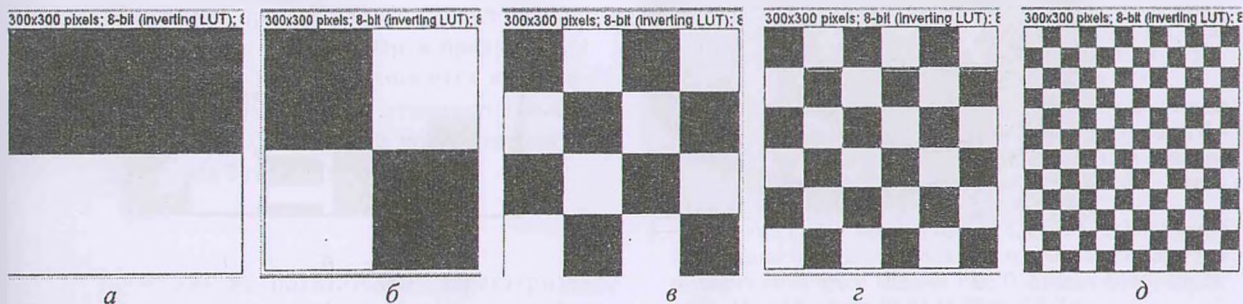


Рисунок 1 — Модель «шахматная доска» для поверхности флокулы–промоины. Фрактальная размерность: $a - 1,93$; $b - 1,87$; $c - 1,79$; $d - 1,75$; $e - 1,74$

Fig. 1 — Model “checkerboard” for the surface of the floccule–gullies. Fractal dimension: $a - 1.93$; $b - 1.87$; $c - 1.79$; $d - 1.75$; $e - 1.74$

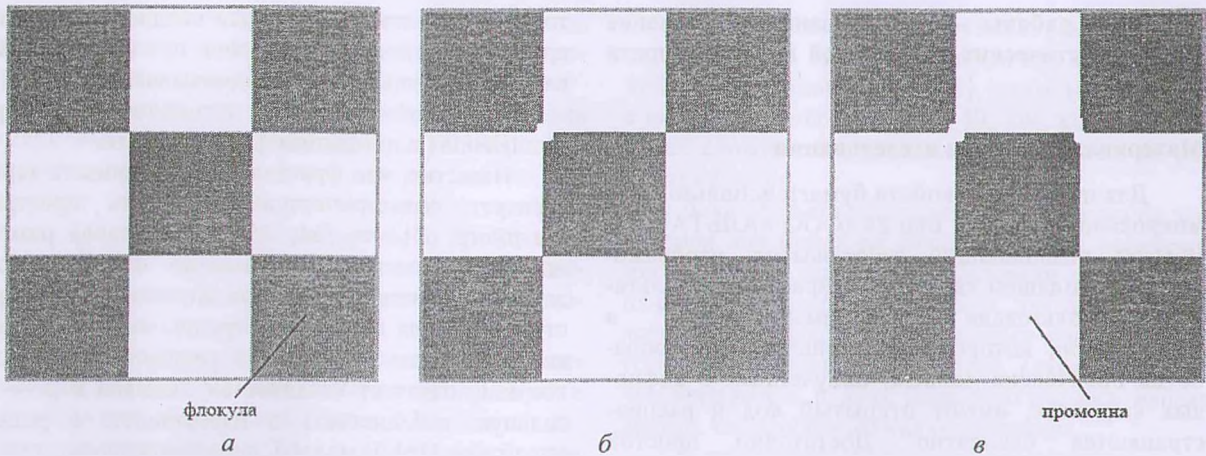


Рисунок 2 — Модель флокулы–промоины: а – четыре промоины, б – три промоины, в – две промоины
 Fig. 2 — Model floccules–gullies: а – four gullies, б – three gullies, в – two gullies

от геометрического центра масс характеризует неоднородность поверхности. Для количественной оценки отклонения для этого показателя использовали Евклидовое расстояние (рис. 3).

Рассмотрим следующий показатель — разность максимального и минимального значений оттенков серого. В принципе, неоднородность бумаги не может быть охарактеризована четкой границей перехода флокулы–промоины. Такие переходы для 8-битного файла характеризуются набором 256 оттенков серого. Поэтому, на наш взгляд, наряду с разностью максимального и минимального значений оттенков серого целесообразно также использовать оценку количества оттенков серого цифрового файла при просвечивании бумаги. Увеличение количества оттенков серого связано с ростом равномерности переходов при постоянной разности между максимальным и минимальным значением оттенков серого и, следовательно, должно уменьшить проблемы восприятия краски бумагой. Очевидно и то, что уменьшение разности между максимальным и минимальным значениями оттенков серого также

приводит к аналогичному результату.

Рассматривая приведенные выше критерии, следует прийти, на наш взгляд, к следующим выводам. Существует три группы критериев, которые отражают различные особенности неравномерности покрытия поверхности флокулами или промоинами. Первая группа — среднее квадратичное отклонение, размах, количество оттенков серого. Вторая группа — отклонение центра масс от геометрического среднего. Третья группа — энтропия Шенона, количество и/или размер участков, принимаемых за флокулы (промоины).

Ниже в качестве примера приведены результаты обработки трех видов офисной бумаги массой 80 г/м², выпускаемой производителями под марками Снегурочка, Svetocopy, Economy. Все виды бумаг относятся к классу офисных бумаг С.

Для измерения использовали микроскоп «Альтаи Био 2», позволяющий оцифровывать изображение в проходящем свете, результаты обрабатывали с помощью программ ImageJ и JMicroVision. На рис. 4 представлены цифровые

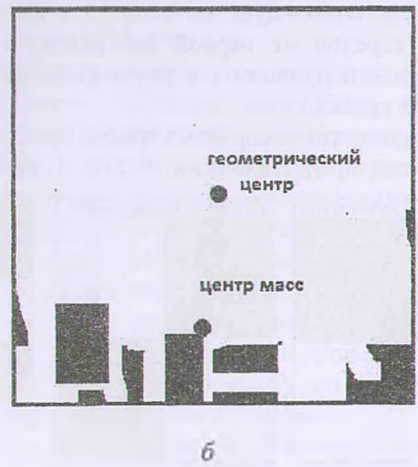


Рисунок 3 — Модель «геометрический центр–центр масс» как пример учета неоднородностей: а – классическая модель; б – модель неоднородностей на поверхности бумаги
 Fig. 3 — Model “geometric center–mass center” as an example of taking into account unhomogeneities: а – classical model; б – model of unhomogeneities on the paper surface

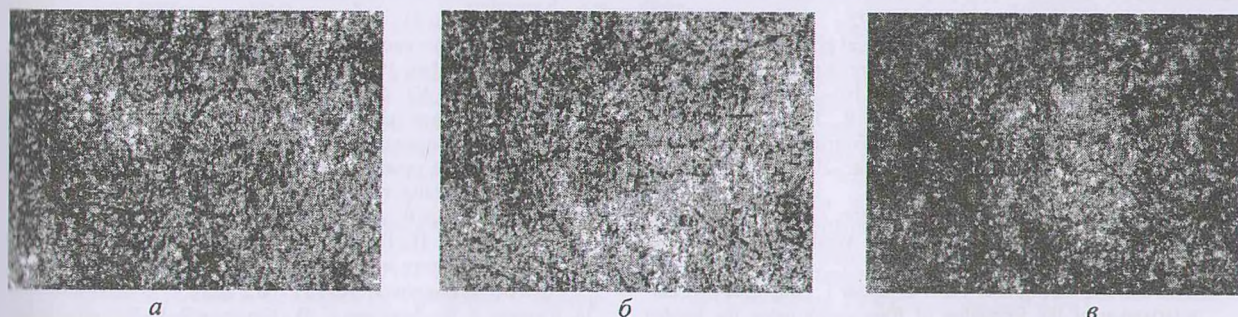


Рисунок 4 — Цифровое изображение бумаг: а — Снегурочка; б — Svetocopy; в — Economy
Fig. 4 — Digital image of papers: a — Snegurochka; б — Svetocopy; в — Economy

изображения для трех образцов исследуемых бумаг.

Для сравнения данных с различными единицами измерения обычно используют коэффициент вариации. В таблице представлены коэффициенты вариации по результатам обработки пяти параллельных определений для трех видов бумаг.

Таблица — Коэффициенты вариации по результатам обработки пяти параллельных определений для трех видов бумаг

Table — Variation coefficients based on the results of processing five parallel definitions for three types of papers

Показатель \ Бумага	Svetocopy	Снегурочка	Economy
Среднеквадратичное отклонение яркости, %	12,0	11,9	13,1
Энтропия по яркости, %	1,69	0,46	0,45
Фрактальная размерность, %	1,2	0,8	1,5
Индекс формования, %	10,4	6,3	8,4
Количество оттенков, %	5,34	3,52	6,75
Разность между макс. и мин. значениями серого, %	5,8	4,2	7,6
Отклонение центра масс от геометрического центра, %	41,2	43,1	21,9

Очевидно, что наиболее стабильные результаты характерны для таких показателей, как энтропия и фрактальная размерность, наименее — отклонения центра масс от геометрического среднего и среднеквадратичное отклонение.

Бумага Снегурочка по большинству показателей, отражающих просвет, превосходит другие образцы. Интересно отметить, что в предыдущем нашем исследовании, которое относится к термостиранию ряда офисных бумаг, отмечается высокое качество бумаги Снегурочка по сравнению с другими офисными бумагами [37].

Выводы

Проведен анализ показателей, характеризующих неоднородность просвета поверхности бумаги. На модели «шахматная доска» показано, что такие показатели, как среднеквадратичное откло-

нение яркости и индекс формования, не всегда пригодны при некоторых распределениях флюк-улы-промоины. В качестве альтернативы предложено использовать следующие показатели: энтропия по Шенону, фрактальная размерность, минимальное значения оттенков серого, разность между максимальным и минимальным значениями серого, отклонения центра масс от геометрического центра изображения.

Предложены три группы показателей, каждая из которых отвечает за описание неравномерности покрытия поверхности флокулами или промоинами.

В качестве показателей качества, характеризующих стабильность просвета бумаги, использовали коэффициенты вариации для этих показателей.

По результатам анализа на просвет трех офисных бумаг массой 80 г/м², относящихся к одному классу, показано, что по величине коэффициента вариации наименее чувствительными являются величина фрактальной размерности и энтропии, затем следует показатель количества оттенков серого, разность между максимальным и минимальным значениями оттенков серого, индекс формования и, наконец, среднеквадратичное отклонение яркости и отклонение центра масс от геометрического центра.

Результаты работы могут быть использованы для разработки количественного метода оценки неоднородности бумаги.

Литература

1. Герасюта С. М., Смолин А. С., Иванова Е. И., Каневская В. С. Исследование коэффициента вариации и среднего размера неоднородности для различных типов бумаги на анализаторе просвета АП-2 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 217. С. 238–247. doi: 10.21266/2079-4304.2016.217.238–247
2. А. с. 1794247 СССР, МПК G 01 N 21/89. Способ определения стандартизованных показателей неоднородности просвета бумаги / Б. В. Галактионов, Ю. П. Сырников, Е. И. Иванова, И. А. Ферсман. N 4795249/25; заявл. 26.02.90; опубл. 07.02.93, Бюл. N 5. 5 с.
3. А. с. 119002 СССР, МПК G 01 J 1/16, G 01 N 33/34. Способ определения облачности бумаги и т.п. изделий и прибор для осуществления этого способа / С. П. Крозер. N 601728/29; заявл. 13.06.58; опубл. 01.01.59, Бюл. N 7. 3 с.
4. Абрамова В. В., Гурьев А. В. Оценка равномерности формирования макроструктуры офисной бумаги // Известия вузов. Лесной журнал. 2017. № 4. С. 172–186.

- doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.172.
5. Berniè J. P., Murray Douglas W. J. Local grammage distribution and formation of paper by light transmission image analysis // *Tappi Journal*, 1996, vol. 79, no. 1, pp. 193–202.
 6. Bouydaïn M., Colom J. F., Navarro R., Pladellorens J. Determination of paper formation by Fourier analysis of light transmission images // *Appita journal*, 2001, vol. 54, no. 2, pp. 103–106.
 7. Characterization of Clocks and Oscillators / eds.: Sullivan D. B., Allan D. W., Howe D. A., Walls F. L. Washington : U. S. government printing office, 1990. 352 p.
 8. Lehmann M., Eisengraber-Pabst J., Ohser J., Moghiseh A. Characterization of the formation of filter paper using the bartlett spectrum of the fiber structure // *Image Analysis & Stereology*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 77–87. doi: 10.5566/ias.v32.p77-87
 9. Остапчук А. К., Михалищев А. Г., Кузнецова Е. М. Оценка процесса выглаживания для обеспечения оптимальной шероховатости поверхности катания с использованием детерминированного хаоса // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2015. № 3. С. 111–128.
 10. Осипов С. П., Подшивалов И. И., Осипов О. С., Алибскова А. А., Чесноков Д. В. Способ оценки площади оптической неоднородности на основе анализа цифровых изображений // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 3. С. 103–112.
 11. Кулак М. И., Пиотух И. Г., Позднев Г. Н. Фрактальный подход к описанию микроструктуры печатной бумаги // *Квалилогия книги: сб. науч. работ. Львов, 1998. С. 24–25.*
 12. Кулак М. И. Фрактальная механика материалов. Минск : Вышэйшая школа, 2002. 304 с.
 13. Пиотух И. Г., Кулак М. И., Боброва О. П. Влияние фрактальных особенностей структуры на физико-механические свойства печатной бумаги // *Труды БГТУ. Физико-математические науки и информатика*. 2000. Вып. 8. С. 73–81.
 14. Пиотух И. Г. Влияние фрактальной структуры поверхностей печатного контакта на процесс переноса краски: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Минск, 2003. 20 с.
 15. Медведева О. И. Управление качеством обработанной поверхности при резании на основе искусственного интеллекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Комсомольск-на-Амуре, 2002. 175 с.
 16. Коряковская Н. В., Попов В. К. Применение теории фракталов для оценки структурной неоднородности бумажного полотна // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2007. № 6. С. 115–119.
 17. Дунаев Д. В. Системный подход к обеспечению требуемых печатных свойств бумаги на основе информации о качестве печати: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03; 05.13.01. СПб, 2006. 145 с.
 18. Бобров В. И., Варепо Л. Г., Голунов А. В. Применение теории фракталов для описания и моделирования поверхности печатных материалов // *Вестник МГУП*. 2010. № 6. С. 76–81.
 19. Голунов А. В., Варепо Л. Г., Ихлазов С. З. К вопросу оценки неоднородности поверхности материалов для печати // *Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки*. 2011. № 6. С. 132–135.
 20. Кудря А. В., Соколовская Э. А., Ахмедова Т. Ш., Пережогин В. Ю. Информативность морфологии структур твердых сплавов для прогноза качества наплавов // *Цветные металлы*, 2017. № 12. С. 78–83.
 21. Кудря А. В., Соколовская Э. А., Пережогин В. Ю., Ахмедова Т. Ш., Васильев С. Г. Использование компьютеризированных процедур для оценки неоднородности структур твердых сплавов // *Металлург*. 2016. № 12. С. 77–80.
 22. Пережогин В. Ю. Оценка факторов, определяющих воспроизводимость результатов цифровых измерений структур в сталях и сплавах: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. М., 2020. 235 с.
 23. Викторов А. С. Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 191 с.
 24. Дроздов Д. С. Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геоэкологии: автореф. дис. ... доктора геолого-минералогических наук: 25.00.36. Тюмень, 2004. 49 с.
 25. Ивашугина Л. И., Николаев В. А. К анализу ландшафтной структуры физико-географических регионов // *Вестник МГУ. География*. 1969. № 4. С. 49–59.
 26. Кузнецов П. Ю. Оценка пространственной изменчивости свойств массива горных пород для оптимизации сети инженерно-геологических скважин при разведке угольных месторождений: на примере Эльгинского месторождения: автореф. дис. ... канд. геолого-минералогических наук: 25.00.16. Томск, 2005. 24 с.
 27. Белоглазов В. И., Гурьев А. В., Комаров В. И. Анизотропия деформативности и прочности тарного картона и методы ее оценки. Архангельск: АГТУ, 2005. 252 с.
 28. Казаков Я. В., Зеленова С. В., Комаров В. И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картоно-лайнсров // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2007. № 3. С. 110–120.
 29. Линдблад Г., Юха Ю. С. Настройка БДМ для оптимизации прочностных свойств картона для плоских слоев гофрированного картона и бумаги для гофрирования с помощью анализа на TSO тестере // *Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы I Международной научно-технической конференции (Архангельск, 13–17 сентября 2011 г.)*. Архангельск, 2011. С. 78–87.
 30. Lindblad G., Fürst T. The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board. Sweden : Lorentzen and Wettre, 2001. 100 p.
 31. 2D FSensor – Lab formation Sensor // *Techpap. Innovation for paper* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.techpap.com/lab-formation-sensor/lab-device,6.html> (дата обращения: 18.03.2021).
 32. Николаев Е. С. Влияние процессов массоподготовки и формирования на равномерность макроструктуры бумаги: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. СПб., 2015. 184 с.
 33. Комаров В. И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск, 2002. 440 с.
 34. Щербанос С. А. Программная реализация построения фрактального ряда и определения его показателя Херста: бакалаврская работа: 01.03.02. Тольятти, 2018. 43 с. [Электронный ресурс]. URL: https://dspace.tltsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/7878/Щербанос%20С.А._ПМИ6-1402.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 28.01.2021).
 35. Фрактальная размерность // *Википедия* [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фрактальная_размерность (дата обращения: 28.01.2021).
 36. Apostolescu N., Baran D. Algorithm and code for analyzing hyperspectral images using the Hurst exponent // *INCAS Bulletin*, 2014, vol. 6, is. 3, pp. 3–11. doi: 10.13111/2066-8201.2014.6.3.1
 37. Зильберглейт М. А., Вашук В. В., Кузнецова Т. Ф., Сычева О. А., Будейко Н. Л., Маевская О. И., Шевчук М. О., Нестерова С. В., Чубис П. А. Сравнительная оценка устойчивости к старению офисных бумаг различных производителей // *Известия вузов. Проблемы полиграфии и издательского дела*, 2016. №3. С. 16–27.

References

1. Gerasyuta S. M., Smolin A. S., Ivanova E. I., Kanevskaya V. S. Issledovanie koeffitsi-enta variatsii i srednego razmera neodnorodnosti dlya razlichnykh tipov bumagi na analizatore prosveta AP-2 [Investigation of the coefficient of variation and the average size of inhomogeneity for various types of paper on the AP-2 lumen analyzer]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii], 2016, is. 217, pp. 238–247. doi: 10.21266/2079-4304.2016.217.238-247
2. Galaktionov B. V., Szymikow Yu. P., Ivanova E. I., Fersman I. A. Sposob opredeleniya standartizovannykh pokazateley neodnorodnosti prosveta bumagi [Method for determination of standardized indicators of non-uniformity of paper clearance]. Patent SU, no. 1794247, 1993.
3. Krozer S. P. Sposob opredeleniya oblachnosti bumagi i t.p. izdelyi i pribor dlya osushchestvleniya etogo sposoba [A method for detecting cloudiness of paper, etc. products and a

- device for implementing this method]. Patent US. no. 119002, 1959.
4. Abramova V. V., Gur'ev A. V. Otsenka ravnomernosti formovaniya makrostruktury ofisnoy bumagi [Evaluation of the uniformity of forming the macrostructure of office paper]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Universities. Forest Journal], 2017, no. 4, pp. 172–186. doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.172.
 5. Bernié J. P., Murray Douglas W. J. Local grammage distribution and formation of paper by light transmission image analysis. *Tappi Journal*, 1996, vol. 79, no. 1, pp. 193–202.
 6. Bouydaï M., Colom J. F., Navarro R., Pladellourens J. Determination of paper formation by Fourier analysis of light transmission images. *Appita journal*, 2001, vol. 54, no. 2, pp. 103–106.
 7. *Characterization of Clocks and Oscillators*. Eds.: Sullivan D. B., Allan D. W., Howe D. A., Walls F. L. Washington: U. S. government printing office, 1990. 352 p.
 8. Lehmann M., Eisengraber-Pabst J., Ohser J., Moghiseh A. Characterization of the formation of filter paper using the bartlett spectrum of the fiber structure. *Image Analysis & Stereology*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 77–87. doi: 10.5566/ias.v32.p77-87
 9. Ostapchuk A. K., Mikhailishchev A. G., Kuznetsova E. M. Otsenka protsessa vyglazhivaniya dlya obespecheniya optimal'noy sherokhovatosti poverkhnosti kataneya s ispol'zovaniem determinirovannogo khaosa [Evaluation of the smoothing process to ensure optimal roughness of the rolling surface using deterministic chaos]. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology], 2015, no. 3, pp. 111–128.
 10. Osipov S. P., Podshivalov I. I., Osipov O. S., Alibekova A. A., Chesnokov D. V. Sposob otsenki ploshchadi opticheskoy neodnorodnosti na osnove analiza tsifrovyykh izobrazheniy [Method for estimating the area of optical inhomogeneity based on the analysis of digital images]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2015, no 3, pp. 103–112.
 11. Kulak M. I., Piotukh I. G., Pozdnev G. N. Fraktal'nyy podkhod k opisaniyu mikrostruktury pechatnoy bumagi [Fractal approach to describing the microstructure of printing paper]. *Kvalilogiya knigi* [Quality of the book]. L'vov, 1998, pp. 24–25.
 12. Kulak M.I. *Fraktal'naya mekhanika materialov* [Fractal Material Mechanics]. Minsk: Vysheyschaya shkola Publ., 2002. 304 p.
 13. Piotukh I. G., Kulak M. I., Bobrova O. P. Vliyaniye fraktal'nykh osobennostey struktury na fiziko-mekhanicheskie svoystva pechatnoy bumagi [Influence of fractal features of the structure on the physical and mechanical properties of printing paper]. *Trudy BGTU: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika* [Proceedings of the BSTU: Physical and mathematical sciences and computer science], 2000, is. 8, pp. 73–81.
 14. Piotukh I. G. Vliyaniye fraktal'noy struktury poverkhnostey pechatnogo kontakta na protsess perenosa kraski. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Influence of the fractal structure of printed contact surfaces on the ink transfer process. PhD eng. sci. diss. abstract]. Minsk, 2003. 20 p.
 15. Medvedeva O. I. Upravleniye kachestvom obrabotannoy poverkhnosti pri rezanii na osnove iskusstvennogo intellekta. Diss. kand. tekhn. nauk [Artificial Intelligence Based Cutting Surface Quality Control. PhD eng. sci. diss.]. Komsomol'sk-na-Amure, 2002. 175 p.
 16. Koryakovskaya N. V., Popov V. K. Primeneniye teorii fraktalov dlya otsenki struktural'noy neodnorodnosti bumazhnogo polotna [Application of the theory of fractals to assess the structural heterogeneity of the paper web]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Universities. Forest Journal], 2007, no 6, pp. 115–119.
 17. Dunaev D. V. Sistemnyy podkhod k obespecheniyu trebuyemykh pechatnykh svoystv bumagi na osnove informatsii o kachestve pechati. Diss. kand. tekhn. nauk [A systematic approach to ensuring the required printability of paper based on information about print quality. PhD eng. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2006. 145 p.
 18. Bobrov V. I. Primeneniye teorii fraktalov dlya opisaniya i modelirovaniya poverkhnosti pechatnykh materialov [Application of the theory of fractals for describing and modeling the surface of printed materials]. *Vestnik MGUP* [Bulletin of Moscow State University of Printing Arts], 2010, no. 6, pp. 76–81.
 19. Golunov A. V., Varepo L. G., Ikhlazov S. Z. K voprosu otsenki neodnorodnosti poverkhnosti materialov dlya pechati [To the question of assessing the surface heterogeneity of materials for printing]. *Izvestiya vuzov. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskije nauki* [Proceedings of Universities. North Caucasian Region. Technical science], 2011, no. 6, pp. 132–135.
 20. Kudrya A. V., Sokolovskaya E. A., Akhmedova T. Sh., Perezhogin V. Yu. Informativnost' morfologii struktur tverdykh splavov dlya prognoza kachestva naplavok [Informative value of the morphology of hard alloy structures for predicting the quality of surfacing]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2017, no. 12, pp. 78–83.
 21. Kudrya A. V., Sokolovskaya E. A., Perezhogin V. Yu., Akhmedova T. Sh., Vasil'ev S. G. Is-pol'zovaniye komp'yuterizirovannykh protsedur dlya otsenki neodnorodnosti struktur tverdykh splavov [Using computerized procedures to assess the heterogeneity of cemented carbide structures]. *Metallurg* [Metallurgist], 2016, no. 12, pp. 77–80.
 22. Perezhogin V. Yu. Otsenka faktorov, opredelyayushchikh proizvodimost' rezul'tatov tsifrovyykh izmereniy struktur v stal'yakh i splavakh. Diss. kand. tekhn. nauk [Assessment of the factors that determine the reproducibility of the results of digital measurements of structures in steels and alloys. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2020. 235 p.
 23. Viktorov A. S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of the landscape]. Moscow: Tratek Publ., 1998. 191 p.
 24. Drozdov D. S. Informatsionno-kartograficheskoe modelirovaniye prirodno-tekhnogennykh sred v geokriologii. Avtoref. diss. dokt. geol.-mineralog. nauk [Information-cartographic modeling of natural and technogenic environments in geocryology. Dr. geol. sci. diss. abstract]. Tyumen', 2004. 49 p.
 25. Ivashutina L. I., Nikolaev V. A. K analizu landshaftnoy struktury fiziko-geograficheskikh regionov [On the analysis of the landscape structure of physical and geographical regions]. *Vestnik MGU. Geografiya* [Bulletin of Moscow State University. Geography], 1969, no. 4, pp. 49–59.
 26. Kuznetsov P. Yu. Otsenka prostranstvennoy izmenchivosti svoystv massiva gornykh porod dlya optimizatsii seti inzhenerno-geologicheskikh skvazhin pri razvedke ugol'nykh mestorozhdeniy: na primere El'ginskogo mestorozhdeniya. Avtoref. diss. kand. geol.-mineralog. nauk [Assessment of the spatial variability of the properties of the rock mass for the optimization of the network of engineering-geological wells in the exploration of coal deposits: for example, the Egla deposit. PhD geol. sci. diss. abstract]. Tomsk, 2005. 24 p.
 27. Beloglazov V. I., Gur'ev A. V., Komarov V. I. *Anizotropiya deformativnosti i prochnosti tarnogo kartona i metody ee otsenki* [Anisotropy of deformability and strength of containerboard and methods for its assessment]. Arkhangel'sk: AGTU Publ., 2005. 252 p.
 28. Kazakov Ya. V., Zelenova S. V., Komarov V. I. Vliyaniye neodnorodnosti struktury na kharakteristiki zhestkosti kartonovlaynerov [Influence of structure heterogeneity on the stiffness characteristics of cardboard liners]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Universities. Forest Journal], 2007, no. 3, pp. 110–120.
 29. Lindblad G., Yukha Yu. S. Nastroyka BDM dlya optimizatsii prochnostnykh svoystv kar-tona dlya ploskikh sloev gofirovannogo kartona i bumagi dlya gofirovaniya s pomoshch'yu analiza na TSO testere [PM tuning to optimize paperboard strength properties for flat layers of corrugated board and corrugated paper using TSO analysis]. *Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov»* [Proceedings of the I International Scientific and Technical Conference “Problems of mechanics of pulp and paper materials”]. Arkhangel'sk, 2011, pp. 78–87.
 30. Lindblad G., Fürst T. *The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board*. Sweden: Lorentzen and Wettre, 2001. 100 p.
 31. 2D FSensor – Lab formation Sensor. Available at: <http://www.techpap.com/lab-formation-sensor,lab-device,6.html> (accessed 18 March 2021).
 32. Nikolaev E. S. Vliyaniye protsessov massopodgotovki i formovaniya na ravnomernost' makrostruktury bumagi. Diss. kand.

- tekh. nauk [Influence of the processes of stock preparation and forming on the uniformity of the paper macrostructure. PhD eng. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2015. 184 p.
33. Komarov V. I. *Deformatsiya i razrushenie voloknistykh tsellyulozno-bumazhnykh materialov* [Deformation and destruction of fibrous pulp and paper materials]. Arkhangel'sk, 2002. 440 p.
34. Shcherbonos S. A. Programmaya realizatsiya postroeniya fraktal'nogo ryada i opredeleniya ego pokazatelya Khersta: bakalavrskaya rabota [Software implementation of constructing a fractal series and determining its Hurst exponent. Bachelor's work]. Tol'yatti, 2018. 143 p. Available at: https://dspace.tltsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/7878/Щербонос%20С.А._ПМИ6-1402.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed 28 January 2021).
35. Fraktal'naya razmernost' [Fractal dimension]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фрактальная_размерность (accessed 28 January 2021).
36. Apostolescu N., Baran D. Algorithm and code for analyzing hyperspectral images using the Hurst exponent. *INCAS Bulletin*, 2014, vol. 6, is. 3, pp. 3–11. doi: 10.13111/2066-8201.2014.6.3.1
37. Zil'bergleyt M. A., Vashuk V. V., Kuznetsova T. F., Sycheva O. A., Budeyko N. L., Maevskaya O. I., Shevchuk M. O., Nesterova S. V., Chubis P. A. Sravnitel'naya otsenka ustoychivosti k stareniyu ofisnykh bumag razlichnykh proizvoditeley [Comparative assessment of resistance to aging of office papers from different manufacturers]. *Izvestiya vuzov. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela* [Proceedings of Universities. Printing and publishing problems], 2016, no. 3, pp. 16–27.

Поступила в редакцию 11.06.2021

© М. А. Зильбергейт, И. В. Марченко, О. П. Старченко, С. В. Нестерова, 2021