

УДК 676.017:004.932

М. А. Зильберглейт¹, Н. П. Мидуков², С. К. Грудо¹, А. А. Коренькова¹, О. Г. Совастей¹¹Белорусский государственный технологический университет²Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна (Российская Федерация)**ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА «РЕГУЛА»
В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЗОВ**

В данном исследовании были использованы результаты измерений, полученные с помощью оптического анализатора «Регула» для двух типов бумаги: бумаги марки Clairefontaine и бумаги для офсетной печати. Обработка изображений проводилась с применением технологий, основанных на методах распознавания образов. В качестве дескрипторов были выбраны значения яркости, стандартного отклонения и коэффициентов асимметрии и эксцесса гистограммы яркости. В результате применения дискриминационного анализа, вероятностных нейронных сетей и метода главных компонент для обучения на 30 образцах (по 10 для каждого типа бумаги) было установлено, что использование этих методов позволило достичь 100%-ной точности обучения.

Предложенный подход применения методов распознавания образов при обработке данных имеет значение для отраслей, связанных с производством бумажной продукции. Может быть использован для идентификации при поддержании стандартов качества бумаги. В будущем с его помощью можно раскрыть новые горизонты в идентификации бумаги и ее потенциал для революционных изменений в различных секторах бумажной промышленности, например в разработке эффективных систем, способных автоматически распознавать и сортировать бумагу по различным критериям. Это, в свою очередь, даст возможность сократить количество брака и в печатной продукции.

Ключевые слова: донное просвечивание, бумага, методы распознавания образов, нейронные сети, дискриминационный анализ.

Для цитирования: Зильберглейт М. А., Мидуков Н. П., Грудо С. К., Коренькова А. А., Совастей О. Г. Применение оптического анализатора «Регула» в задачах классификации образов // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2025. № 1 (291). С. 26–33.

DOI: 10.52065/2520-6729-2025-291-4.

M. A. Zilbergleit¹, N. P. Midukov², S. K. Grudo¹, A. A. Koren'kova¹, O. G. Sovastey¹¹Belarusian State Technological University²Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (Russian Federation)**APPLICATION OF THE OPTICAL ANALYZER “REGULA” IN THE PROBLEMS
OF IMAGE CLASSIFICATION**

In this study, we used the measurement results obtained with the Regula optical analyzer for two types of paper: Clairefontaine paper and offset paper. Image processing was carried out using technologies based on pattern recognition methods. The values of brightness, standard deviation and coefficients of asymmetry and excess of the brightness histogram were chosen as descriptors. By applying discriminative analysis, probabilistic neural networks and principal component method for training on 30 samples (10 for each type of paper), it was found that the use of these methods achieved 100% training accuracy.

The proposed approach of applying pattern recognition techniques to data processing is important for industries related to the production of paper products. It can be used for identification in maintaining paper quality standards. In the future, it can be used to unlock new horizons in paper identification and its potential to revolutionize various sectors of the paper industry, for example in the development of efficient systems capable of automatically recognizing and sorting paper according to various criteria. This, in turn, offers the opportunity to reduce the amount of defects in printed products as well.

Keywords: bottom transillumination, paper, pattern recognition methods, neural networks, discriminative analysis.

For citation: Zilbergleit M. A., Midukov N. P., Grudo S. K., Koren'kova A. A., Sovastey O. G. Application of the optical analyzer “Regula” in the problems of image classification. *Proceedings of BSTU, issue 4, Print- and Mediatechnologies*, 2025, no. 1 (291), pp. 26–33 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6729-2025-291-4.

Введение. В современном мире, где объем информации стремительно увеличивается, эффективные методы обработки и анализа данных становятся все более важными для повышения ценности информации и облегчения принятия решений. Одной из ключевых задач в этой области является идентификация различных материалов, включая бумагу, что имеет существенное значение для архивирования, печати и дальнейших процессов переработки.

Распознавание типов бумаги – это не просто вопрос классификации. Оно необходимо для обеспечения контроля качества, проверки подлинности и разработки эффективных процессов переработки. Идентификация бумаги представляет собой сложный процесс, требующий применения разнообразных методов и технологий, включая физические методы распознавания образов.

Методы распознавания образов, особенно те, которые основаны на физических характеристиках, предлагают многообещающие решения для идентификации бумаги. Они анализируют такие параметры, как текстура, плотность, цвет и другие физические свойства бумаги. Эти методы позволяют не только классифицировать бумагу по типам и качеству, но и выявлять подделки, что особенно актуально в условиях современного рынка, где фальсификация продукции становится все более распространенной.

Основная часть. Системы распознавания образов, использующие физические методы, могут включать в себя как традиционные подходы, такие как визуальный анализ, так и современные технологии, основанные на машинном обучении и нейронных сетях. Такие технологии позволяют автоматизировать процесс идентификации, значительно повышая как скорость, так и точность классификации бумаги. Например, алгоритмы машинного обучения можно применять для распознавания больших наборов данных образцов бумаги, что позволяет разрабатывать сложные модели, которые могут предсказывать тип бумаги на основе ее физических характеристик. Более того, использование физических методов в распознавании образов выходит за рамки простой идентификации. Она охватывает ряд аналитических методов, включая спектроскопию, микроскопию и технологии визуализации, которые обеспечивают более глубокое понимание свойств материала бумаги. Эти методы не только помогают в процессе идентификации, но и способствуют лучшему пониманию состава бумаги и потенциальных применений.

Так, исследование методов идентификации бумаги с применением физического распознавания образов открывает новые возможности для повышения эффективности обработки информации, в том числе и защиты от подделок. В данной статье

рассмотрен метод оптического анализа, используемый в распознавании образов бумаги, а также некоторые методы обработки данных.

Следует отметить, что начиная примерно с 2020 г. число публикаций по применению упомянутых ранее информационных технологий в бумажной и полиграфической отрасли резко возросло. Авторами представленной статьи приводится лишь небольшое количество источников, относящихся к данной тематике.

В источнике [1] представлен новый подход к идентификации бумаги, основанный на гибридных признаках. Этот метод сочетает в себе характеристики текстуры, извлеченные из изображений с использованием матрицы совпадений серого уровня (GLCM) и сверхточной нейронной сети (CNN), с дополнительным набором признаков, также полученных с помощью CNN на тех же изображениях. Авторы применили предложенный метод для классификации семи основных марок бумаги, доступных на корейском рынке, и достигли точности 97,66%. Результаты подтверждают эффективность данного метода для визуального осмотра бумажной продукции и подчеркивают его потенциал в раскрытии уголовных дел, связанных с подделкой документов.

Чанг и соавторы [2] предложили новый метод извлечения текстурных признаков, основанный на мере направления и алгоритме слияния матрицы совпадения уровней серого (GLCM). Он использует GLCM для извлечения значений текстурных признаков изображения и интегрирует весовой коэффициент, вводимый мерой направления, для получения окончательного текстурного признака. В рамках экспериментов по классификации изображений дистанционного зондирования с высоким разрешением был выбран классификатор опорной векторной машины (SVM) с алгоритмом слияния меры направления и матрицы совпадения уровней серого.

Для оценки результатов классификации применялись как качественные, так и количественные методы. Экспериментальные данные показали, что извлечение текстурных признаков на основе алгоритма слияния обеспечило лучшее распознавание изображений, а точность классификации значительно возросла.

В источнике [3] рассматривается использование элементного состава, определенного с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), для характеристики бумаги. Образцы широко используемой офисной бумаги из семнадцати различных источников были проанализированы на предмет их элементного состава после микроволнового разложения в растворе азотной кислоты и перекиси водорода. Применялась белая офисная бумага формата А4 плотностью 80 г/м². Были установлены пределы обнаружения,

инструментальная точность и потенциальные матричные помехи для 23 наиболее распространенных элементов, обнаруженных в бумаге, определена изменчивость распределения этих элементов в стопке бумаги. Девять элементов (Na, Mg, Al, Mn, Sr, Y, Ba, La и Ce) были выбраны в качестве подходящих дискриминаторов, поскольку обладали достаточно высокими и однородными концентрациями. Все семнадцать документов можно было различить с помощью статистических *t*-тестов (99% достоверности), применив только две из этих элементных концентраций (Mn и Sr). Результаты также представлены с учетом использования тройных диаграмм, которые применяют три межэлементные ассоциации для отображения различий в составе бумаги. Четыре отдельные партии одной линии продукции с одного и того же завода, произведенные с ежемесячными интервалами, также были различены с помощью элементных концентраций. Три неизвестных образца, взятых случайным образом из семнадцати бумаг, были правильно идентифицированы по их элементному составу; два неизвестных образца из четырех партий были идентифицированы аналогичным образом. Результаты показывают, что элементный анализ с использованием ICP-MS обеспечивает эффективную и надежную методику для различения бумаги для документов.

Янг с соавторами [4] применяли ближнюю инфракрасную спектроскопию (NIR) в сочетании с многомерными статистическими методами для подтверждения возможности классификации ханджи (вид корейской бумаги высокого качества) на основе различных типов сырья. Бумаги ханджи были изготовлены из бумажной шелковицы, кулинарных агентов и слизи. Всего с помощью NIR было собрано 60 спектров ханджи, которые затем сгруппировали в четыре категории: контроль, бумажная шелковица, тип слизи на основе каждого из видов сырья, содержащегося в ханджи.

Типы ханджи классифицировали с помощью трех различных алгоритмов – дискриминантный

анализ с применением частичных наименьших квадратов (PLS-DA), опорные векторные машины (SVM) и метод случайной функции (RF). Наилучшие показатели классификации материалов ханджи были получены для категории группы спектров ханджи по типу бумажной шелковицы, где точность прогнозирования PLS-DA, SVM и RF составила 100%, 100% и 98% соответственно. Эти результаты свидетельствуют о том, что NIR в сочетании с многомерными статистическими методами можно применять для классификации материалов ханджи.

В источнике [5] анализируется возможность использования инфракрасной спектроскопии в сочетании с алгоритмами машинного обучения для классификации копировальной бумаги. Был собран набор данных, содержащий 140 инфракрасных спектров образцов копировальной бумаги. Модели классификации, применяемые в этом исследовании, включают частичный дискриминантный анализ наименьших квадратов, машину опорных векторов и К-ближайших соседей. Основные выводы показывают, что модель классификации, основанная на использовании инфракрасной спектроскопии с ослабленным полным отражением, продемонстрировала хорошие характеристики.

Применение разнообразных физических методов для заявленных выше целей можно также найти в источниках [6–11].

Оптические исследования образцов бумаги осуществлялись на приборе контроля подлинности документов «Регула» 4325, разработанном компанией «Регула» – крупнейшим производителем экспертных продуктов для проверки подлинности документов [12].

В качестве образов были выбраны образцы импортной бумаги Clairefontaine, (80 г/м²) и бумаги для офсетной печати (60 г/м²). Количество экспериментальных точек составило 30: по 10 для каждого объекта.

Примеры изображения исследуемых образцов приведены на рис. 1.

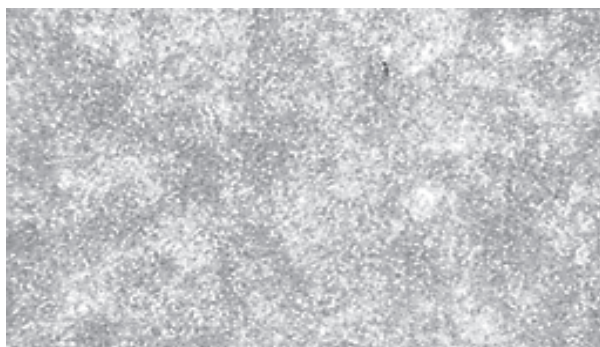
*a**б*

Рис. 1. Изображения образцов бумаги:
a – Clairefontaine; *б* – офсетная

В основе анализа лежало несколько методов. Вероятностный нейронный сетевой классификатор (PNN), который реализует непараметрический метод для классификации наблюдений в одну из g групп на основе p наблюдаемых количественных переменных. Вместо того чтобы делать какие-либо предположения о характере распределения переменных внутри каждой группы, он строит непараметрическую оценку функции плотности каждой группы в желаемом месте на основе соседних наблюдений из этой группы с использованием окна Парзена, которое взвешивает наблюдения из каждой группы в соответствии с их расстоянием от указанного местоположения. Наблюдения назначаются группам на основе произведения трех факторов: оценочная функция плотности в окрестности точки, априорные вероятности принадлежности к каждой группе, затраты на неправильную классификацию случаев, принадлежащих данной группе [13].

Дискриминантный анализ – статистический метод, используемый для различения и прогнозирования членства в группах на основе нескольких предикторных переменных. Он особенно эффективен в областях распознавания образов, машинного обучения и классификации данных (предлагает надежную математическую основу для прогнозирования категориальных результатов). Понимая его основные принципы, такие как вычисление дискриминантной функции и оценка ее точности, можно значительно улучшить аналитические возможности в различных областях исследований и приложений. В данном исследовании использовался линейный дискриминантный анализ (LDA), или анализ дискриминантной функции, – это обобщение линейного дискриминанта Фишера, метода, применяемого в статистике и других областях для поиска линейной комбинации признаков, характеризующей или разделяющей два либо более классов объектов или событий [14].

Метод главных компонент – метод, основная цель которого заключается в том, чтобы преобразовать многомерные данные в более низкоразмерное пространство, сохраняя при этом как можно больше информации. В результате сокращается количество признаков в наборе данных, что может значительно ускорить процесс обучения классификаторов и уменьшить риск переобучения. Это особенно полезно, когда исходные данные имеют высокую размерность и много коррелирующих признаков. Снижение размерности с помощью метода главных компонент также позволяет визуализировать данные в 2D или 3D, что может помочь в понимании структуры данных и в выявлении кластеров, а это очень важно для задач классификации и идентификации [15].

В качестве параметров были выбраны яркость в градациях серого, среднееквадратичное отклонение,

асимметрия и эксцесс гистограммы распределения яркости.

В табл. 1 приведены исходные данные для об-счета, основанные на значениях яркости, стандарт-ного отклонения, асимметрии и эксцесса гисто-граммы яркости.

Таблица 1
Показатели для классификации бумаги

Вид бумаги	Основные показатели			
	яркость	станд. отклонение	коэф. асимм.	эксцесс
Бумага Clairefontaine	213,670	15,012	–0,167	–0,363
	221,227	14,266	–0,168	–3,484
	223,536	13,133	–0,037	–7,963
	206,021	16,667	–0,233	1,153
	217,396	14,681	–0,070	–3,041
	203,325	16,897	–0,241	1,781
	217,027	14,994	–0,170	–2,183
	207,829	17,481	–0,219	0,424
	212,847	14,611	–0,102	–0,769
	221,844	14,400	–0,136	–4,788
Бумага для офсетной печати	232,996	18,641	–1,199	1,369
	222,177	20,433	–0,655	–0,643
	234,148	17,954	–1,249	1,863
	225,828	19,638	–0,746	–0,975
	236,994	15,647	–1,348	2,929
	228,408	18,120	–0,751	–1,115
	220,275	22,236	–0,637	–0,439
	227,789	19,465	–0,890	–0,238
	233,046	18,051	–1,159	1,264
	224,241	22,944	–0,855	0,082

В табл. 2 приведены стандартизированные значения коэффициентов дискриминационной функции.

Таблица 2
Стандартизированные значения коэффициентов дискриминационной функции F

Переменные	F
Col_1	1,71493
Col_2	1,80642
Col_3	–0,401666
Col_4	0,257404

Использование стандартного приема сравнения, основанного на попиксельном анализе изображений, показало наибольшую степень сходства в образцах, что в принципе и следовало ожидать, так как полученные объекты взяты из совершенно разных выборок. Тем не менее сходство изображений Clairefontaine и бумаги офсетной составило 49%. Следовательно, формальный анализ, основанный только на разнице в значениях яркости пикселей, вряд ли приемлем в данной ситуации.

Таким образом, например, дискриминационная функция имеет вид

$$\text{Col}_5 = 1,71493 \cdot \text{Col}_1 + 1,80642 \cdot \text{Col}_2 - 0,401666 \cdot \text{Col}_3 + 0,257404 \cdot \text{Col}_4, \quad (1)$$

где Col_5 – значение дискриминантной функции; Col_1 – яркость; Col_2 – стандартное отклонение; Col_3 – коэффициент асимметрии; Col_4 – эксцесс.

В табл. 3 представлены результаты классификации дискриминационного анализа.

Таблица 3

Результаты классификации дискриминационного анализа (процент правильно классифицированных 100%)

Бумага	Размер группы	Степень соответствия	
		бумага Clairefontaine	бумага для офсетной печати
Бумага Clairefontaine	10	10 (100,00%)	0 (0,00%)
Бумага для офсетной печати	10	0 (0,00%)	10 (100,00%)

Используя технологию Forward Selection, можно получить и лучший результат: 100%-ное распознавание, и при этом дискриминационная функция имеет следующий вид:

$$\text{Col}_5 = 1,46196 \cdot \text{Col}_1 + 1,74829 \cdot \text{Col}_2 - 0,631257 \cdot \text{Col}_3. \quad (2)$$

Нужно обратить внимание, что качество классификации не ухудшилось.

Графическая интерпретация полученных с применением технологии Forward Selection результатов показана на рис. 2.

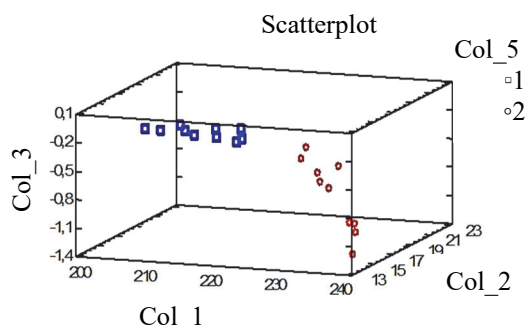


Рис. 2. Графическая иллюстрация разделения двух классов бумаг методом дискриминации

Результаты использования нейросети для обучения продемонстрированы на рис. 3 и 4. Как следует из полученных данных, применение методики, основанной на нейронных сетях, также показывает 100%-ное разделение.

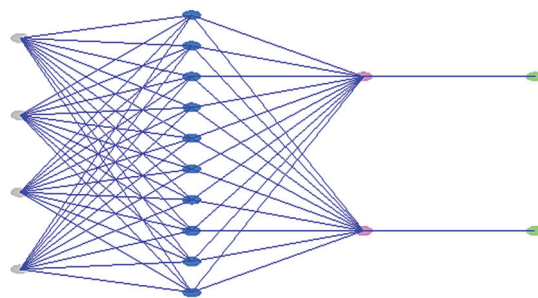
Input layer Pattern layer Summation layer Output layer
(4 variables) (20 cases) (2 neurons) (2 groups)

Рис. 3. Нейронная сеть, использованная для обучения

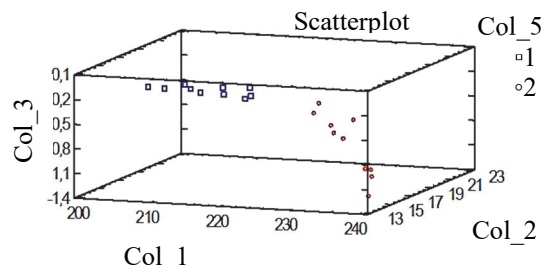


Рис. 4. 3D. проекция результатов обучения для нейронной сети

Как уже отмечалось выше, процедура метода главных компонент выполняет анализ, целью которого является получение небольшого числа линейных комбинаций 4 переменных, объясняющих большую часть изменчивости данных. В представленном случае были извлечены 2 компонента, которые объясняют примерно 86% изменчивости исходных данных, что представлено в табл. 4.

Таблица 4

Анализ методом главных компонент

Число компонент	Собственные значения	Дисперсия	Накопленная общность, %
1	2,46805	61,701	61,701
2	0,991131	24,778	86,480
3	0,533806	13,345	99,825
4	0,00701427	0,175	100,000

По результатам метода построен график в координатах главных компонент (рис. 5).

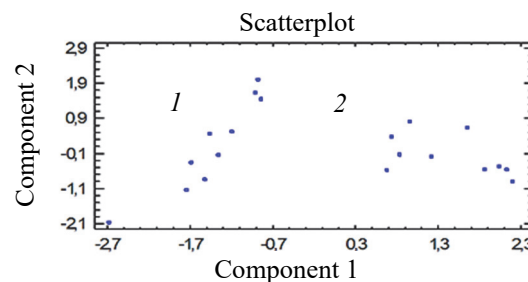


Рис. 5. Графическая интерпретация анализа методом главных компонент:

1 – бумага Clairefontaine; 2 – офсетная бумага

Из графика следует, что и эта технология также позволяет получить 100%-ный результат идентификации.

Заключение. Выше был приведен простой и эффективный пример использования методов распознавания образов при обработке данных с помощью функции донного света в аппарате «Регула».

Авторы данной статьи полагают, что предложенный подход имеет значение для отраслей, связанных с производством бумажной продукции, он может быть использован для идентификации при поддержании стандартов качества и обеспечения устойчивости процессов. Исследовав пересечение распознавания образов и физического анализа,

в будущем можно раскрыть новые горизонты в идентификации бумаги и ее потенциал для революционных изменений в различных секторах бумажной промышленности. Например, это может привести к разработке более эффективных систем, способных автоматически распознавать и сортировать бумагу по критериям, таким как тип, качество и состав. Это, в свою очередь, позволит сократить количество брака в печатной и другой бумажной продукции. В юридической сфере точная идентификация бумаги может сыграть ключевую роль в подтверждении подлинности документов, что особенно актуально в условиях нарастающих угроз фальсификации.

Список литературы

1. Identification of document paper using hybrid feature extraction / J. Lee [et al.] // *J. Forensic Sci.* 2023. No. 68 (5). P. 1808–1815. DOI: 10.1111/1556-4029.15330.
2. A study for texture feature extraction of high-resolution satellite images based on a direction measure and gray level co-occurrence matrix fusion algorithm / X. Zhang [et al.] // *Sensors (Basel)*. 2017. No. 17 (7). P. 1474. DOI: 10.3390/s17071474.
3. Spence L. D., Baker A. T., Byrne J. P. Characterization of document paper using elemental compositions determined by inductively coupled plasma mass spectrometry // *J. Anal At Spectrom.* 2000. No. 15 (7). P. 813–819. DOI: 10.1039/b001411g.
4. Jang K. L., Heo T. Y., Jeong S. H. Classification option for Korean traditional paper based on type of raw materials, using near-infrared spectroscopy and multivariate statistical methods // *BioRes.* 2020. No. 15 (4). P. 9045–9058. DOI: 10.15376/biores.15.4.9045-9058.
5. Lee Y., Lee T., Kim H. Classification analysis of copy papers using infrared spectroscopy and machine learning modeling // *BioResources*. 2023. No. 19 (1). P. 160–182. DOI: 10.15376/biores.19.1.160-182.
6. Cheng Sh. Y., Chen Y. F., Jean Ch.-Ch. Forensic applications of portable x-ray fluorescence spectrometer: glass samples // *Journal of the Chinese Chemical Society Taipei*. 2015. No. 62. P. 125–132. DOI: 10.1002/jccs.201400229.
7. A scientific method for forensic examination of paper / Reeta R Gupta // *IP International Journal of Forensic Medicine and Toxicological Sciences*. 2018. No. 3 (2). P. 18–20. DOI: 10.18231/2456-9615.2018.0005.
8. Abunadi I., Senan T. M. Multi-method diagnosis of blood microscopic sample for early detection of acute lymphoblastic leukemia based on deep learning and hybrid techniques // *Sensors (Basel)*. 2022. No. 22 (4). P. 1629. DOI: 10.3390/s22041629.
9. Gray level co-occurrence matrix (GLCM) texture based crop classification using low altitude remote sensing platforms / N. Iqbal [et al.] // *PeerJ Computer Science*. 2021. No. 7 (8): e536. DOI: 10.7717/peerj-cs.536.
10. Lee J., Kim H., Kang T. Y. Classification algorithm using halftone features of counterfeit bills and CNN // *J. Forensic Sci.* 2022. No. 67 (1). P. 345–352. DOI: 10.1111/1556-4029.14867.
11. Classification modeling method for hyperspectral stamp-pad ink data based on one-dimensional convolutional neural network / S. Wang [et al.] // *J. Forensic Sci.* 2022. No. 67 (2). P. 550–561. DOI: 10.1111/1556-4029.14909.
12. Прибор контроля подлинности документов «Регула» 4325 // ООО «Регула». URL: https://regula.by/ru/products/express_verification/4325/ (дата обращения: 12.12.2024).
13. Бодянский Е. В., Рябова Н. В., Золотухин О. В. Классификация текстовых документов с помощью нейронной сети встречного распространения с контролируемым обучением // *Бионика интеллекта*. 2014. № 1 (82). С. 3–6.
14. Клекка У. Р., Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У. Факторный, кластерный и дискриминантный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
15. Мокеев В. В., Томилов С. В. О решении задачи распознавания изображений методом главных компонент и линейным дискриминантным анализом // *Компьютерная оптика*. 2014. Т. 38, № 4. С. 871–880.

References

1. Lee J., Kim H., Yook S., Kang T. Y. Identification of document paper using hybrid feature extraction. *J. Forensic Sci.* 2023, no. 68 (5), pp. 1808–1815. DOI: 10.1111/1556-4029.15330.
2. Zhang X., Cui J., Wang W., Lin C. A study for texture feature extraction of high-resolution satellite images based on a direction measure and gray level co-occurrence matrix fusion algorithm. *Sensors (Basel)*, 2017, no. 17 (7). P. 1474. DOI: 10.3390/s17071474.

3. Spence L. D., Baker A. T., Byrne J. P. Characterization of document paper using elemental compositions determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. *J. Anal At Spectrom*, 2000, no. 15 (7), pp. 813–819. DOI: 10.1039/b001411g.
4. Jang K. J., Heo T. Y., Jeong S. H. Classification option for Korean traditional paper based on type of raw materials, using near-infrared spectroscopy and multivariate statistical methods. *BioRes*, 2020, no. 15 (4), pp. 9045–9058. DOI: 10.15376/biores.15.4.9045-9058.
5. Lee Y., Lee T., Kim H. Classification analysis of copy papers using infrared spectroscopy and machine learning modeling. *BioResources*, 2023, no. 19 (1), pp. 160–182. DOI: 10.15376/biores.19.1.160-182.
6. Cheng Sh.-Y., Chen Y.-F., Jean Ch.-Ch. Huang forensic applications of portable x-ray fluorescence spectrometer: glass samples. *Journal of the Chinese Chemical Society Taipei*, 2015, no. 62, pp. 125–132. DOI: 10.1002/jccs.201400229.
7. Reeta R Gupta A scientific method for forensic examination of paper. *IP International Journal of Forensic Medicine and Toxicological Sciences*, 2018, no. 3 (2), pp. 18–20. DOI: 10.18231/2456-9615.2018.0005.
8. Abunadi I., Senan T. M. Multi-method diagnosis of blood microscopic sample for early detection of acute lymphoblastic leu-kemia based on deep learning and hybrid techniques. *Sensors (Basel)*, 2022, no. 22 (4). P. 629. DOI: 10.3390/s22041629.
9. Iqbal N., Mumtaz R., Shafi U., Zaidi S. M. H. Gray level co-occurrence matrix (GLCM) texture based crop classification using low altitude remote sensing platforms. *Peer J. Computer Science*, 2021, no. 7 (8): e536. DOI: 10.7717/peerj-cs.536.
10. Lee J., Kim H., Kang T. Y. Classification algorithm using halftone features of counterfeit bills and CNN. *J. Forensic Sci*, 2022, no. 67 (1), pp. 345–352. DOI: 10.1111/1556-4029.14867.
11. Wang S., He H., Lv R., He W., Li C., Cai N. Classification modeling method for hyperspectral stamp-pad ink data based on one-dimensional convolutional neural network. *J. Forensic Sci*, 2022, no. 67 (2), pp. 550–561. DOI: 10.1111/1556-4029.14909.
12. Device for checking the authenticity of documents “Regula” 4325. *ООО “Regula”* [Regula LLC]. Available at: https://regula.by/ru/products/express_verification/4325/ (accessed 12.12.2024) (In Russian).
13. Bodyanskiy Ye. V., Ryabova N. V., Zolotukhin O. V. Classification of text documents using counter propagation neural network with controlled training. *Bionika intellekta* [Bionics of Intelligence], 2014, no. 1 (82), pp. 3–6 (In Russian).
14. Klekka U. R., Kim Dzh.-O., M'iuller Ch. U. *Faktornyy, klasternyy i diskriminantnyy analiz* [Factor, cluster and discriminant analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989. 215 p. (In Russian).
15. Mokeyev V. V., Tomilov S. V. On the solution of the image recognition problem by a principal component method and linear discriminant analysis. *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2014, vol. 38, no. 4, pp. 871–880 (In Russian).

Информация об авторах

Зильберглейт Марк Аронович – доктор химических наук, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mazi@list.ru

Мидуков Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики и автоматизированного проектирования. Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (ул. Ивана Черных, 4, В-409, 198095, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: gturp-igar@bk.ru

Грудо Сергей Казимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: Grudo@belstu.by

Коренькова Анастасия Александровна – магистр, старший преподаватель кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: korenkova@belstu.by

Совастей Ольга Геннадьевна – старший научный сотрудник центра физико-химических методов исследования. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sevastey@belstu.by

Information about the authors

Zilbergleit Mark Aronovich – DSc (Chemistry), Professor, the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mazi@list.ru

Midukov Nikolay Petrovich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Graphics and Computer-Aided Design. Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (V-409 4 Ivan Chernykh str., 198095, St. Petersburg, Russian Federation). E-mail: gturpi-gap@bk.ru

Grudo Sergey Kazimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Grudo@belstu.by

Koren'kova Anastasiya Aleksandrovna – Master, Senior Lecturer, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korenkova@belstu.by

Sovastey Olga Gennad'yevna – Senior Researcher, the Center for Physical and Chemical Research Methods. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sevastey@belstu.by

Поступила 16.01.2025