

УДК 004.056:655.3.026.7

М. А. Зильберглейт¹, Н. П. Мидуков², С. К. Грудо¹, И. В. Николайчик¹¹Белорусский государственный технологический университет²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (Российская Федерация)**ПРИМЕНЕНИЕ КОСОПАДАЮЩЕГО СВЕТА ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ БУМАГ**

Известен способ анализа поверхности бумаги при использовании косоппадающего света. Ранее было показано, что такой подход дает больше информации, чем при использовании прямого света, падающего на бумагу. В настоящем исследовании были применены данные, полученные при анализе изображений с использованием косоппадающего света (оптический анализатор «Регула») для двух типов бумаги: бумага марки Clairefontaine и бумага для офсетной печати. Анализатор «Регула» дает возможность получать цифровой файл изображения в системе RGB. Такой подход позволяет решить ряд задач, связанных с идентификацией бумажных материалов. Обработка изображений проводилась с применением технологий, основанных на методах распознавания образов. В качестве дескрипторов использовались характеристики яркости, стандартного отклонения, минимального значения яркости, коэффициентов асимметрии и эксцесса гистограммы яркости. В качестве стандартных методов обработки информации были выбраны методы дискриминационных вероятностей нейронных сетей и метод главных компонент. В результате применения дискриминационного анализа, вероятностных нейронных сетей и методов главных компонент для обучения на 20 образцах (по 10 для каждого типа бумаги) было установлено, что использование этих методов позволило достичь точности обучения, равной 85–100%.

Ключевые слова: косоппадающий свет, бумага, методы распознавания образов, яркость.

Для цитирования: Зильберглейт М. А., Мидуков Н. П., Грудо С. К., Николайчик И. В. Применение косоппадающего света при идентификации бумаг // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (295). С. 57–64.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-8.

M. A. Zilbergleyt¹, N. P. Midukov², C. K. Grudo¹, I. V. Nikolaichik¹¹Belarusian State Technological University

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (Russian Federation)

APPLICATION OF OBLIQUE LIGHT IN IDENTIFICATION OF PAPER

There is a known method for analyzing the surface of paper using oblique light. Earlier it was shown that this approach allows you to get much more information than when obtaining direct light falling on paper. In this study, the data obtained during the analysis of images using oblique light (optical analyzer “Regula”) for two types of paper were used: Clairefontaine paper and offset printing paper. The analyzer “Regula” allows you to obtain a digital image file in the RGB system. This approach allows you to solve a number of problems related to the identification of paper materials. Image processing was carried out using technologies based on pattern recognition methods. The luminance, standard deviation, minimum luminance value, skewness coefficients, and excess values of the luminance histogram were used as descriptors. The methods of discriminatory probabilities of neural networks and principal component methods were used as standard methods of information processing. As a result of the use of discriminatory analysis, probabilistic neural networks and the principal component method for training on 20 samples (10 for each type of paper), it was found that the use of these methods made it possible to achieve a training accuracy of 85–100%.

Keywords: oblique light, paper, pattern recognition methods, brightness.

For citation: Zilbergleyt M. A., Midukov N. P., Grudo C. K., Nikolaichik I. V. Application of oblique light in identification of paper. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 57–64 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-8.

Введение. Одним из наиболее многообещающих методов, используемых для повышения надежности идентификации, стало применение косоппадающего света. Этот метод основывается на анализе взаимодействия света с веществом, что дает возможность выявлять уникальные характеристики бумаги и защищенных элементов,

таких как водяные знаки, микропечать и другие защищенные признаки, которые не удается обнаружить при использовании световых потоков в более привычных спектрах. Наоборот, косоппадающий свет позволяет оправдывать его применение на ряде элементов, охраняемых и признанных флагманскими.

Метод косопadaющего света не только позволяет обнаруживать подделки, но и дает возможность всесторонне анализировать оригинальные документы. Например, его применение может помочь в обнаружении множества изменений. Исправления или даже небольшие изменения в текстах либо изображениях можно с высокой вероятностью выявить с помощью косопadaющего света. Этот метод также позволяет проверять, действительно ли имеется та или иная охранная подпись, не нарушая целостности проверяемого документа, что особенно важно для паспортов, виз, финансовых документов, сертификатов и других бумаг, в которых наличие или отсутствие даже малозаметного изменения может повлечь за собой серьезные последствия.

Помимо этого, использование косопadaющего света может быть объединено с рядом других технологий, например с компьютерным зрением и машинным обучением, чтобы создать более совершенные системы идентификации. Данные системы могут легко и быстро анализировать изображения документов и выявлять в них признаки подтасовки.

Введение косопadaющего света в практику проверки документов не только улучшает качество идентификации, но и способствует повышению уровня безопасности в целом. Это особенно важно в условиях растущей угрозы мошенничества и подделок, когда традиционные методы не всегда способны обеспечить необходимую защиту. В данной работе будет рассмотрено применение оптических методов в идентификации бумаги, их преимущества и недостатки, а также примеры успешного использования в различных областях (банки, государственные учреждения и правоохранительные органы). Анализ существующих технологий и методов позволит глубже понять, как косопadaющий свет может стать важным инструментом в обеспечении безопасности и достоверности документов, а также в борьбе с мошенничеством.

Методы распознавания образов, особенно те, которые основаны на физических характеристиках, предлагают многообещающие решения для идентификации бумаги. Они анализируют такие параметры, как текстуру, плотность, цвет и другие физические свойства бумаги. 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.

Системы распознавания образов, использующие физические методы, могут включать в себя как традиционные подходы, например визуальный анализ, так и современные технологии, основанные на машинном обучении и нейронных сетях.

Данные технологии позволяют автоматизировать процесс идентификации, значительно повышая как скорость, так и точность классификации бумаги. Например, алгоритмы машинного обучения можно научить распознавать образы в больших наборах данных образцов бумаги, что позволяет разрабатывать сложные модели, предсказывающие тип бумаги на основе ее физических характеристик. Более того, применение 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 отличные от простого распознавания образы, в которых закодирована информация о материале, полезны не только для идентификации, но и способствуют лучшему пониманию состава бумаги и ее потенциальному применению.

Таким образом, исследование методов идентификации бумаги с использованием физического распознавания образов открывает новые горизонты для повышения эффективности обработки информации, включая защиту от подделок. В представленной статье мы подробно рассмотрим метод оптического анализа, применяемый в распознавании образов бумаги, а также обсудим ряд методов обработки данных, которые способствуют улучшению точности и надежности идентификации.

Следует отметить, что, начиная примерно с 2020 г. число публикаций по применению упомянутых ранее информационных технологий в бумажной и полиграфической отрасли резко возросло. Мы приводим лишь небольшое число 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.

Zhang и соавторы [2] предложили новый метод извлечения текстурных признаков, основанный на мере направления и алгоритме слияния матрицы совпадения уровней серого (GLCM). Этот метод 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 применен классификатор опорной векторной машины (SVM) с алгоритмом слияния меры направления и матрицы совпадения уровней серого. Для оценки результатов классификации использовались 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 применяемой офисной бумаги (белая, формат А4, массовая нагрузка 80 г/м²) из семнадцати различных источников были проанализированы на предмет их элементного состава после микроволнового разложения в растворе азотной кислоты и перекиси водорода. В результате 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 их концентрации были достаточно высокими и однородными. Все семнадцать документов можно было различить с помощью статистических *t*-тестов (99% достоверности), используя только две из этих элементных концентраций (Mn и Sr). Итоги также представлены с применением тройных диаграмм, которые используют 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 путем использования элементных концентраций. Три неизвестных образца, выбранных 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 применением ИСП-МС обеспечивает эффективную и надежную методику для различения бумаги для документов.

Jang с соавторами [4] использовали ближнюю инфракрасную спектроскопию (NIR) в сочетании с многомерными статистическими методами

для подтверждения возможности классификации ханджи (вид бумаги) 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 три категории: контроль, бумажная шелковица, тип слизи на основе каждого из типов сырья, содержащегося в ханджи. Для классификации типов ханджи использовались три различных алгоритма классификации – 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, при анализе образцов ханджи в соответствии с типом 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 использовать для классификации материалов ханджи.

В источнике [5] анализируется возможность применения 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, используемые в этом исследовании, включают частичный дискриминантный анализ наименьших квадратов, машину опорных векторов и К-ближайших соседей. Основные выводы показывают, что модель классификации, основанная на применении ИК-спектроскопии с ослабленным полным отражением, продемонстрировала хорошие характеристики.

Использование разнообразных физических методов для заявленных выше целей можно также найти в источниках [6–15].

Целью исследования являлось применение ко-сопадающего света при идентификации бумаги.

Предметом исследования выступали закономерности, связывающие оттенки серого цвета, с идентификационными признаками изучаемых бумаг.

Объектом исследования была выбрана бумага марки Clairefontaine и бумага для офсетной печати.

Основная часть. Оптические исследования образцов бумаги осуществлялись на приборе контроля подлинности документов «Регула» 4325.

В качестве образцов использовались импортная бумага Clairefontaine – 80 г/м² и бумага для офсетной печати – 60 г/м². Количество экспериментальных точек составило 20 (по 10 для каждого объекта).

Примеры изображения образцов приведены на рис. 1.

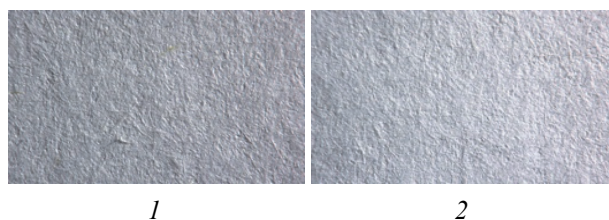


Рис. 1. Изображение образцов бумаги в правом косопадющем свете:

1 – бумага Clairefontaine; 2 – офсетная бумага

Методы анализа:

1) вероятностный нейронный сетевой классификатор (PNN), который осуществляет 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. Оценка строится 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;

2) 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 применялся линейный дискриминантный анализ (LDA), или анализ дискриминантной функции, – это обобщение линейного дискриминанта Фишера, метода, используемого в статистике и других областях для поиска линейной комбинации признаков, характеризующей или разделяющей два либо более классов объектов или событий;

3) 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 в случаях, 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-системах, что может помочь в понимании структуры данных и выявлении кластеров. Это, в свою очередь, важно для задач классификации и идентификации.

В качестве параметров были выбраны яркость в градациях серого, среднеквадратичное отклонение, асимметрия и эксцесс гистограммы распределения яркости.

В табл. 1 приведены исходные данные для об-счета, основанные на значениях яркости, стандартного отклонения, минимальной яркости, асимметрии и эксцесса, полученных из гистограммы яркости.

Таблица 1

Показатели, использованные для классификации бумаги

Бумага Clairefontaine					Бумага для офсетной печати				
яркость	стандартное отклонение	минимальная яркость	коэффициент асимметрии	эксцесс	яркость	стандартное отклонение	минимальная яркость	коэффициент асимметрии	эксцесс
164,597	29,739	74	0,217	–0,292	155,358	23,869	73	0,472	0,054
162,918	28,998	70	0,303	–0,200	163,915	20,182	77	0,384	0,043
184,344	24,808	86	0,097	–0,339	160,867	19,451	77	0,505	–0,148
133,830	28,633	62	0,603	0,260	159,797	21,701	49	0,395	–0,102
185,811	25,883	87	0,067	–0,485	161,080	24,283	77	0,199	–0,187
177,036	27,542	75	0,115	–0,329	191,255	22,069	91	–0,061	–0,201
186,156	27,130	88	0,002	–0,576	150,958	19,944	76	0,570	–0,027
171,647	29,259	75	0,172	–0,332	160,783	21,006	80	0,433	–0,135
177,998	30,066	76	0,083	–0,455	150,958	19,944	76	0,570	–0,027
176,287	21,663	89	0,288	0,108	1160,783	21,006	80	0,433	–0,135

Обсуждение результатов эксперимента: применение стандартного метода сравнения, основанного на попиксельном анализе изображений, показало, что степень сходства между образцами невелика – это было ожидаемо, поскольку объекты выбирались из совершенно разных групп. Тем не менее сходство между изображениями бумаги Clairefontaine и офсетной составило 49%. Таким образом, формальный анализ, основанный исключительно на различиях в значениях яркости пикселей, в данной ситуации вряд ли будет приемлемым.

Ниже (табл. 2) приведены стандартизированные значения коэффициентов дискриминационной функции и одно дискриминационное уравнение с коэффициентами в стандартизованном виде.

Таблица 2
Стандартизированные значения коэффициентов дискриминационной функции F

Переменные	F
Col 1	3,625560
Col 2	2,078790
Col 3	0,339463
Col 4	3,091850
Col 5	0,638881

Таким образом, например, дискриминационная функция выглядит следующим образом:

$$\text{Col}_6 = 3,625560 \cdot \text{Col}_1 + 2,078790 \cdot \text{Col}_2 + 0,339463 \cdot \text{Col}_3 + 3,091850 \cdot \text{Col}_4 + 0,638881 \cdot \text{Col}_5,$$

где Col₆ – значение дискриминантной функции; Col₁ – яркость; Col₂ – стандартное отклонение; Col₃ – минимальное значение яркости; Col₄ – коэффициент асимметрии; Col₅ – эксцесс.

В табл. 3 представлены результаты классификации дискриминационного анализа.

Таблица 3
Результаты классификации дискриминационного анализа (процент правильно классифицированных 95%)

Бумага	Размер группы	Степень соответствия	
		бумага Clairefontaine	бумага для офсетной печати
Бумага Clairefontaine	10	9 (90,00%)	1 (10,00%)
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 вид

$$\text{Col}_5 = 3,245490 \cdot \text{Col}_1 + 1,771290 \cdot \text{Col}_2 + 2,962980 \cdot \text{Col}_4.$$

Графическая интерпретация полученных с применением технологии Forward Selection результатов приведена на рис. 2. При этом степень разделения составляет 100%.

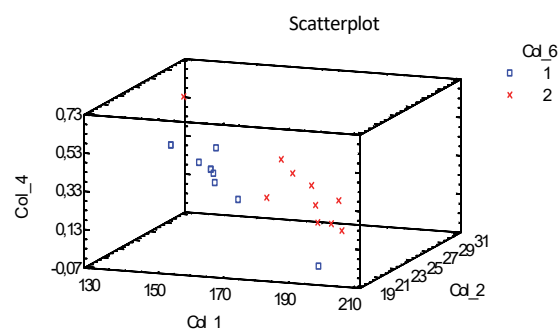


Рис. 2. Графическая иллюстрация разделения двух классов бумаг методом дискриминации

Полученный результат хорошо согласуется с результатами кластерного анализа, дендограмма которого для метода ближайшего соседа при мере близости в виде расстояния Евклида приведена на рис 3.

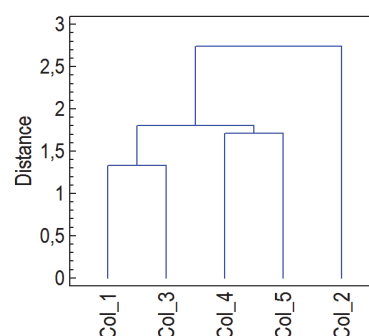


Рис. 3. Дендограмма кластерного анализа по методу ближайшего соседа (мера близости – расстояние Евклида)

Рассмотрим результаты корреляционного анализа. На рис. 4 показана совмещенная диаграмма корреляций между всеми признаками. Практически все они оказались статистически значимыми для уровня достоверности 95%. Однако некоторые пары, имеющие высокие коэффициенты корреляции, были сохранены при использовании технологии Forward Selection.

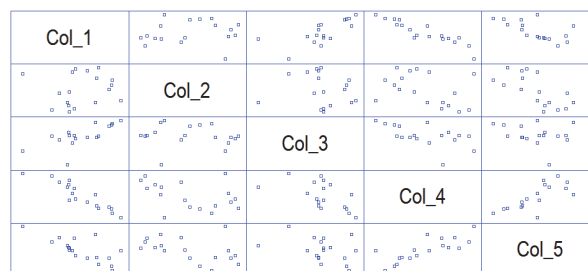
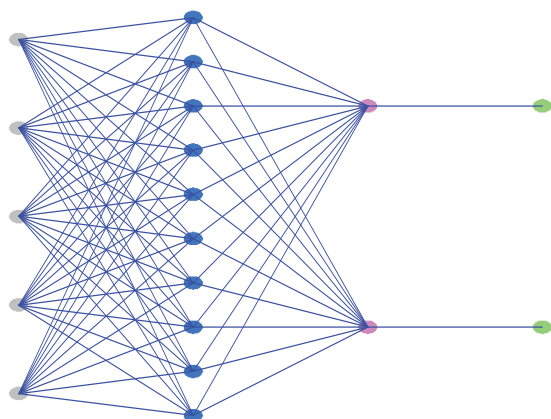


Рис. 4. Совмещенная корреляционная диаграмма между переменными Col₁–Col₄

Результаты использования нейросети для обучения продемонстрированы на рис. 5, 6 и в табл. 4.



Input layer (5 variables) Pattern layer (20 cases) Summation layer (2 neurons) Output layer (2 groups)

Рис. 5. Нейронная сеть, использованная для обучения

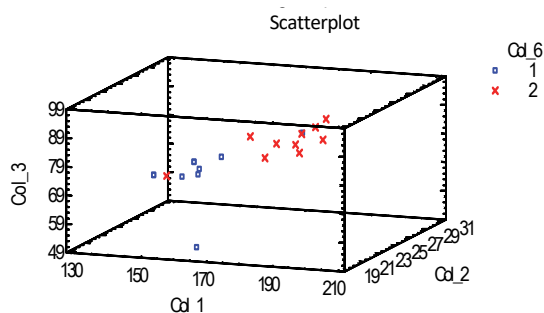


Рис. 6. 3D-проекция результатов обучения для нейронной сети

Таблица 4

Результаты классификации дискриминационного анализа (процент правильно классифицированных 90%)

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	2 (20,00%)	8 (80,00%)

Как следует из полученных данных, методика, основанная на нейронных сетях, демонстрирует лишь 90% разделения.

Использование метода главных компонент позволило выделить две компоненты, которые покрывают 87% дисперсии. Последующая классификация показала, что дискриминационный анализ, использующий двумерные значения главных компонент, дает возможность верно классифицировать 80% первой и второй бумаг. Увеличение числа факторов до 3 позволило лишь незначительно повысить качество идентификации до 85%: 80% для первой бумаги и 90% – для второй. Так как использование третьего фактора дало возможность поднять оценку дисперсии до 94, 8%, то дальнейшее увеличение числа факторов нецелесообразно.

Заключение. 1. Выявлено, что использование методов распознавания образов при обработке данных, полученных в ходе применения функции косопадющего света в аппарате «Регула», показало, что эффективность идентификации падает в ряду методов: дискриминационный анализ, нейронные сети, метод главных компонент.

2. Установлено, что предложенный подход имеет важное значение для отраслей, связанных с производством бумажной продукции, так как он может быть использован для идентификации и поддержания стандартов качества, а также обеспечения устойчивости процессов. Исследуя совмещение распознавания образов и физического анализа, мы можем предположить, что появляются возможности в идентификации бумаги и усиление потенциала для значительных изменений в различных секторах бумажной промышленности. Например, это может привести к созданию более эффективных систем, способных автоматически распознавать и сортировать бумагу по различным критериям, таким как тип, качество и состав. Это, в свою очередь, позволяет снизить уровень 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 растущих угроз фальсификации.

Список литературы

1. Identification of document paper using hybrid feature extraction / J. Lee [et al.] // J. Forensic Sci. 2023. Vol. 68, no. 5. P. 1808–1815. DOI: 10.1111/1556-4029.15330.
2. 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. Vol. 17, no. 7. P. 1474. DOI: 10.3390/s17071474.
3. Spence L., Baker A., Byrne J. Characterization of document paper using elemental compositions determined by inductively coupled plasma mass spectrometry // J. Anal At Spectrom. 2000. Vol. 15, no. 7. P. 813–819. DOI.org/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. Vol. 15, no. 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, Materials Science, Chemistry, Computer Science.* 2019. P. 160–182. DOI:10.15376/biores.19.1.160-182.
6. Shih-Yuan Cheng, Yung-Fou Chen, Chih-Chun Jean Huang. Forensic Applications of Portable X-ray Fluorescence Spectrometer: Glass Samples // *J. Chin. Chem. Soc.* 2015. Vol. 62. P. 125–132.
7. Reeta R., Gupta A. Scientific method for forensic examination of paper // *IP International Journal of Forensic Medicine and Toxicological Sciences.* 2018. Vol. 3, no. 2. P. 18–20.
8. Abunadi I., Senan E. 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. Vol. 22, no. 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.] // *Peer J Comput Sci.* 2021. Vol. 19, no. 7. P. 536. 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. Vol. 67, no. 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. Vol. 67, no. 2. P. 550–561. DOI: 10.1111/1556-4029.
12. Machine learning based gray-level co-occurrence matrix early warning system enables accurate detection of colorectal cancer pelvic bone metastases on MRI / J. Jin [et al.] // *Front Oncol.* 2023. Vol. 13. P. 1121–1594. DOI: 10.3389.
13. Shakya A. K., Ramola A., Vidyarthi A. Modeling of texture quantification and image classification for change prediction due to COVID lockdown using Skysat and PlanetScope imagery // *Model Earth Syst Environ.* 2022. Vol. 8, no. 2. P. 2767–2792. DOI: 10.1007.
14. Assessment of Soybean Lodging Using UAV Imagery and Machine Learning / S. Sarkar [et al.] // *Plants (Basel).* 2023. Vol. 12, no. 16. P. 2893. DOI: 10.3390/plants12162893.
15. Kociolek M., Kozłowski M., Cardone A. A Convolutional Neural Networks-Based Approach for Texture Directionality Detection // *Sensors (Basel).* 2022. Vol. 22, no. 2. P. 562. DOI: 10.3390/s22020562.

References

1. Lee J., Kim H., Yook S., Kang T. Y. Identification of document paper using hybrid feature extraction. *J. Forensic Sci.*, 2023, vol. 68, no. 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, vol. 17, no. 7. P. 1474. DOI: 10.3390/s17071474.
3. Spence L., Baker A., Byrne J. Characterization of document paper using elemental compositions determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. *J. Anal At Spectrom*, 2000, vol. 15, no. 7, pp. 813–819. DOI.org/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. *BioResources*, 2020, vol. 15, no. 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, Materials Science, Chemistry, Computer Science*, 2019, pp. 160–182. DOI:10.15376/biores.19.1.160-182.
6. Shih-Yuan Cheng, Yung-Fou Chen, Chih-Chun Jean Huang. Forensic Applications of Portable X-ray Fluorescence Spectrometer: Glass Samples. *J. Chin. Chem. Soc.*, 2015, vol. 62, pp. 125–132.
7. Reeta R., Gupta A. Scientific method for forensic examination of paper. *IP International Journal of Forensic Medicine and Toxicological Sciences*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 18–20.
8. Abunadi I., Senan E. 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, vol. 22, no. 4. P. 1629. DOI: 10.3390/s22041629.
9. Iqbal N., Mumtaz R., Shafi U., Zaidi S. M. Gray level co-occurrence matrix (GLCM) texture based crop classification using low altitude remote sensing platforms. *Peer J. Comput Sci.*, 2021, vol. 19, no. 7. P. 536. 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, vol. 67, no. 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, vol. 67, no. 2, pp. 550–561. DOI: 10.1111/1556-4029.
12. Jin J., Zhou H., Sun S., Tian Z., Ren H., Feng J., Jiang X. Machine learning based gray-level co-occurrence matrix early warning system enables accurate detection of colorectal cancer pelvic bone metastases on MRI. *Front Oncol*, 2023, vol. 13, pp. 1121–1594. DOI: 10.3389.
13. Shakya A. K., Ramola A., Vidyarthi A. Modeling of texture quantification and image classification for change prediction due to COVID lockdown using Skysat and Planetscope imagery. *Model Earth Syst Environ*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 2767–2792. DOI: 10.1007.
14. Sarkar S., Zhou J., Scaboo A., Zhou J., Aloysius N., Lim T. T. Assessment of Soybean Lodging Using UAV Imagery and Machine Learning. *Plants (Basel)*, 2023, vol. 12, no. 16. P. 2893. DOI: 10.3390/plants12162893.
15. Kociołek M., Kozłowski M., Cardone A. A. Convolutional Neural Networks-Based Approach for Texture Directionality Detection. *Sensors (Basel)*, 2022, vol. 22, no. 2. P. 562. DOI: 10.3390/s22020562.

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, профессор, заведующий кафедрой инженерной графики и автоматизированного проектирования. Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (ул. Большая Морская, 18, 191186, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: midukovnikolai@yandex.ru

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

Николайчик Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikolaichik.ira@mail.ru

Information about the authors

Zilbergleyt Mark Aronovich – PhD (Chemical), 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 – PhD (Engineering), Professor, Head of the Department of Engineering Graphics and Computer-Aided Design. Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (18 Bolshaya Morskaya str., 191186, St. Petersburg, Russian Federation). E-mail: midukovnikolai@yandex.ru

Grudo Sergey Kazimirovich – PhD (Engineering), Head of 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

Nikolaychik Irina Vladimirovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolaichik.ira@mail.ru

Поступила 15.08.2025