

УДК 535.514:620.191.33:336.746

DOI: 10.20535/2077-7264.1(91).2026.358036

© А. І. Добрянський\*, асп., КПІ ім. Ігоря Сікорського, асист., Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, Т. Ю. Киричок, д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, О. В. Коротенко, канд. техн. наук, доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, О. В. Дуболазов, д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, І. В. Солтис, канд. фіз.-мат. наук, доц., Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, М. П. Горський, канд. фіз.-мат. наук, доц., Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, О. Г. Ушенко, д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, М. О. Огірко, канд. техн. наук, асист., Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича

### ПОЛЯРИМЕТРИЧНА ДІАГНОСТИКА СТУПЕНЯ ЗНОШЕННЯ ПАПЕРОВИХ БАНКНОТ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ СТОКС-ЗОБРАЖЕНЬ

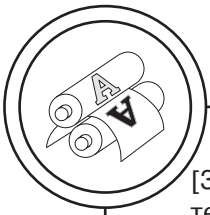
У роботі досліджено можливості поляриметричного методу для оцінювання ступеня зношення паперових банкнот та визначення змін їхньої внутрішньої структури в процесі тривалої експлуатації. Об'єктом дослідження є фрагменти банкнот різного ступеня експлуатаційного зношення, що відрізняються станом поверхні, щільністю волокнистого шару та рівнем механічних пошкоджень. Поляризаційні зображення отримано для чотирьох станів лінійної поляризації ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ), що дало змогу комплексно охарактеризувати поляризаційні властивості досліджуваних зразків.

**Ключові слова:** поляриметрія; параметри Стокса; ступінь лінійної поляризації; паперові банкноти; зношення; обробка зображень.

#### Постановка проблеми

Визначення стану зношеності паперових банкнот є важливим завданням для банківської системи, оскільки ступінь їх зношення безпосередньо впливає на можливість подальшого використання в грошовому обігу, потреби пла-

нової заміни [1], досліджень життєвого циклу [2] та формування виробничих планів. Традиційні методи оцінювання стану банкнот базуються на візуальному та тактильному контролі фахівцями грошового обігу. Автоматизоване сортування банкнот в обробних комплексах



[3], ґрунтується на аналізі характеристик цифрових зображень [4], коли встановлюють великий перелік дефектів та пошкоджень [5]: загальне забруднення паперу (зниження яскравості), стирання рельєфу фарбового шару інтаглідруку, появу локальних плям різного походження, фізичні пошкодження цілісності (надриви, отвори, відсутні кути), деформацію геометричних розмірів, а також деградацію та автентичність [6] захисних елементів, мікротексту та лінійних зон згину. Однак, під час автоматизованого сортування в обробних комплексах складно забезпечити урахування мікроструктурних змін матеріалу паперу, що виникають у процесі тривалої експлуатації [7], а отже — достатню об'єктивність та чутливість визначення зношеності.

Тому дослідження, спрямовані на удосконалення оптичних засобів визначення зношеності та підвищення об'єктивності автоматизованого сортування, що дозволяють урахувати стан основи банкнот, є актуальними.

#### **Аналіз попередніх досліджень**

У процесі використання банкнот відбуваються різноманітні деградаційні процеси, зокрема механічні деформації, забруднення поверхні та руйнування волокнистої структури паперу [8]. Такі зміни впливають не лише на зовнішній вигляд грошових знаків, але й на їх оптичні властивості, що потребує урахування під час сортування [9]. Зокрема, змінюються характеристики розсіювання та поляризаційні властивості світла, що взаємодіє з паперовим матеріалом [10]. На мікрострук-

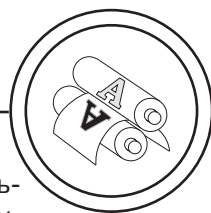
турному рівні інтенсивне тертя та згини призводять до пошкодження фібрил целюлозних волокон і появи локальних мікротріщин, що суттєво підвищує ступінь деполаризації відбитого випромінювання за рахунок багатократного внутрішнього розсіювання [11]. Одночасне адсорбування жирових та пилових часток створює неоднорідну плівку на поверхні паперу [12, 13], яка змінює локальний показник заломлення та призводить до нерівномірного згасання інтенсивності світлового потоку, спотворюючи спектральну та поляризаційну сигнатури захисних елементів [14].

Одним із перспективних підходів до дослідження структури матеріалів є використання поляриметричних методів аналізу [10, 15]. Поляриметрія дозволяє отримати додаткову інформацію про внутрішню мікроструктуру матеріалу, ступінь його оптичної анізотропії та характер розсіювання світла [16, 17]. Особливу роль у таких дослідженнях відіграють параметри Стокса, які повністю описують стан поляризації електромагнітного випромінювання [18].

Аналіз просторових розподілів параметрів Стокса та похідних поляризаційних характеристик дає змогу виявляти структурні зміни в матеріалі, спричинені процесами зношення [10]. Тому застосування поляриметричного аналізу до дослідження паперових банкнот є перспективним напрямом для розроблення об'єктивних методів контролю їх стану.

#### **Мета роботи**

Дослідження змін поляризаційних характеристик паперових бан-



кнот різного ступеня зношення на основі аналізу параметрів Стокс-зображень та визначення інформативних критеріїв оцінювання їхнього стану.

### Результати проведених досліджень

Об'єктом дослідження є фрагменти паперових банкнот номіналом 100 венесуельських боливарів, які на момент дослідження виведені з обігу у Венесуелі та знецінені. Для проведення експериментальних досліджень використано незношені банкноти як еталонні зразки. Подальше штучне зношування здійснювали в імітаторах обігу [4], що дозволяють відтворювати основні механічні та хімічні пошкодження банкнот. Процес зношування імітували шляхом контакту паперових банкнот у закритому контейнері розміром 280×220×220 мм, що обертався навколо осі зі швидкістю 60 об./хв. Як механічний зношувальний агент використовували скляні кульки двох фракцій (діаметром 2 мм та 3,3–3,8 мм, масою по 1 кг кожної фракції) для забезпечення механічних пошкоджень. Для моделювання хімічного впливу застосовували забруднювальну суміш, що складалася з білої глини, соняшникової та оливкової олії, 70 % спирту та компонента, який моделює склад людського поту для відтворення хімічних пошкоджень.

Для проведення експериментальних досліджень сформовано дві групи зразків по 20 банкнот:

- група 1 (незношені банкноти);
- група 2 (після механічного зношування).

Вибір об'єму вибірки у кількості 20 банкнот для кожної групи обумовлений необхідністю забезпечення статистичної значущості отриманих результатів та мінімізації похибки вимірювань при розрахунку середніх значень поляризаційних параметрів зразків.

Для кожної групи відібрано характерні ділянки поверхні паперу, які відображають зміни його структури та ступінь деградації зображення. До найбільш вразливих до зношування ділянок банкнот належать краї та кути, зони згину, елементи інтагліодруку, мікротекст, захисні елементи (магнітні стрічки, водяні знаки), а також ділянки з високим рівнем фарбового покриття. Зазначені області характеризуються підвищеною чутливістю до механічного стирання та забруднення, що призводить до деградації рельєфу, зниження контрастності, зміни мікроструктури паперу та спотворення дрібних деталей зображення (рис. 1). Особливу увагу приділено зонам із інтагліодруком, оскільки зношування даного виду друку спричиняє зміну рельєфу фарбового покриття та мікрорельєфу паперової основи, що дає змогу більш якісно оцінювати зміни на поляризаційних зображеннях.

Для кожної групи банкнот відібрано характерні фрагменти поверхні паперу, вибір яких обґрунтований їхньою високою інформативністю щодо структурної деградації волокон та змін оптико-фізичних характеристик об'єкта. З оптичної точки зору ці ділянки є критичними, оскільки вони характеризуються найбільшою неоднорідністю мікрорельєфу та специфічними механізмами розсіювання світла.

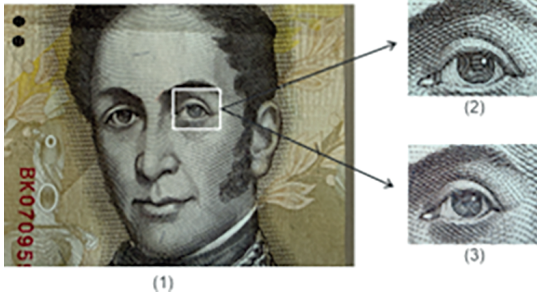
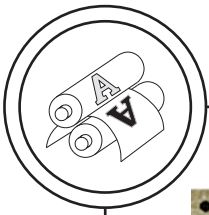


Рис. 1. Приклади фрагментів банкнот різного ступеня зношення: 1 — зображення фрагменту купюри, 2 — поляризаційне зображення незношеної купюри (група 1), поляризаційне зображення купюри з механічним зношенням (група 2)

Зокрема, вибір фрагментів банкнот зумовлений тим, що саме тут відбувається руйнування внутрішньо волоконних зв'язків целюлозної основи, що призводить до зростання коефіцієнта дифузного розсіювання та деполаризації зондуючого випромінювання. Фрагменти з елементами інтаглюдруку обрані через їхній виражений об'ємний профіль: деградація рельєфу фарбового шару та його стирання безпосередньо впливають на стан поляризації відбитого світла, дозволяючи кількісно оцінити ступінь зносу за зміною дзеркальної та дифузної складових відбиття.

На рис. 2 наведено поляризаційний мікроскоп (PG-800 Trinocular Polarizing Microscope) з CCD камерою (ZWO ASI294MM PRO USB3.0) для одержання поляризаційних зображень та сервер на базі процесора Intel зі спеціалізованим програмним забезпеченням MATLAB для подальшої обробки одержаних поляризаційних зображень (розрахунку параметрів Стокса та поляризаційних параметрів) [10].

Поляризаційні зображення досліджуваних фрагментів банкнот отримували за допомогою оптичної системи поляризаційного мікроскопа, що включає джерело освітлення, поляризатор-аналізатор

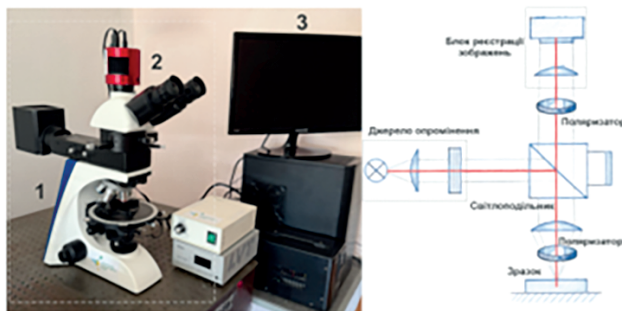
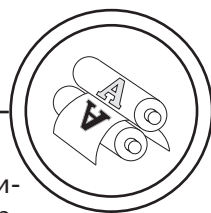


Рис. 2. Устаткування для отримання поляризаційних зображень: поляризаційний мікроскоп PG-800 Trinocular Polarizing Microscope з блоком опромінення 550 нм (1), CCD камера ZWO ASI294MM PRO USB3.0 для реєстрації мікроскопічних поляризаційних зображень (2), сервер на базі процесора Intel для обробки поляризаційних та статистичних параметрів з програмним забезпеченням MATLAB (3)



та інтегровану цифрову ССД камеру реєстрації зображень. Реєстрацію поляризаційних зображень проводили у відбитому світлі для чотирьох станів лінійної поляризації:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  та  $135^\circ$ .

На основі зареєстрованих за допомогою поляризаційного мікроскопа набору поляризаційних зображень ( $I_0$ ,  $I_{90}$ ,  $I_{45}$ ,  $I_{135}$ ) обчислено параметри Стокса відповідно до співвідношень [10, 15–17]:

$$S_0 = I_0 + I_{90}, \quad (1)$$

$$S_1 = I_0 - I_{90}, \quad (2)$$

$$S_2 = I_{45} - I_{135}, \quad (3)$$

де  $I_0$ ,  $I_{90}$ ,  $I_{45}$ ,  $I_{135}$  — мапи інтенсивності світла, зареєстровані для відповідних станів поляризації.

На основі отриманих параметрів визначали:

— ступінь лінійної поляризації:

$$L_p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (4)$$

— азимут поляризації:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (5)$$

Для кожного зразка будували мапи розподілу параметрів Стокса, ступеня лінійної поляризації та азимута поляризації.

У результаті обробки поляризаційних зображень отримано карти просторового розподілу параметрів Стокса  $S_0$ , ступеня лінійної поляризації  $L_p$  та азимута поляризації  $\alpha$ . Аналіз отриманих карт показав наявність суттєвих відмінностей між фрагментами банкнот із різним ступенем експлуатаційного зношення.

На рис. 3 наведено приклади поляризаційних зображень карт параметрів Стокса для досліджуваних зразків.

Аналіз просторових розподілів параметрів Стокса показує, що для зношених банкнот спостерігається більш неоднорідна структура зображень, що пов'язано з деградацією волокнистої структури паперу та зміною умов розсіювання світла.

На основі параметрів Стокса розраховано карти ступеня лінійної поляризації. Приклади таких карт наведено на рис. 4.

З аналізу отриманих карт видно, що для банкнот зі значним ступенем зношення характерне зменшення значень ступеня поляризації та збільшення просторової неоднорідності поляризаційних характеристик.

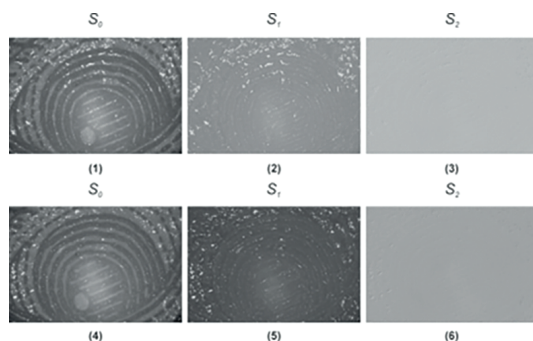


Рис. 3. Карты параметров Стокса  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  для фрагментов банкнот різного ступеня зношення (1, 2, 3 — група 1; 4, 5, 6 — група 2)

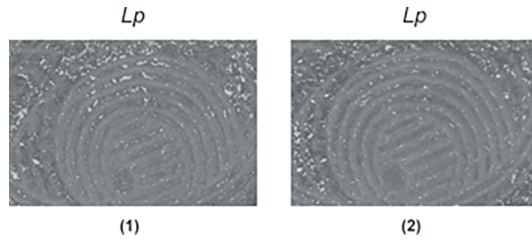
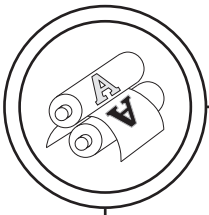


Рис. 4. Просторові карти ступеня лінійної поляризації  $L_p$  для банкнот різного ступеня зношення (1 — група 1; 2 — група 2)

На рис. 5 наведено просторові карти азимута поляризації  $\alpha$  для банкнот різного ступеня зношення.

Для кількісної оцінки змін поляризаційних характеристик проведено статистичний аналіз ступеня лінійної поляризації для досліджуваних груп банкнот. Основні статистичні характеристики наведено в табл. 1.

Як видно з отриманих результатів, для зношених банкнот спостерігається суттєве зменшення середнього значення ступеня лінійної поляризації. Це пояснюється руйнуванням впорядкованої волокнистої структури паперу, що призводить до підвищення рівня дифузного розсіювання та часткової деполаризації світла.

Крім того, для перевірки статистичної значущості відмінностей між досліджуваними групами застосовано t-критерій Ст'юдента.

Отримане значення статистики  $t = 3.87$  перевищує критичне значення для рівня значущості  $p < 0.05$  [18–20], що свідчить про статистично достовірну різницю між поляризаційними характеристиками нових та зношених банкнот.

Таким чином, результати дослідження показують, що параметри Стокса та ступінь лінійної поляризації є інформативними характеристиками для оцінювання ступеня зношення паперових банкнот. Отримані поляриметричні параметри можуть бути використані як основа для створення автоматизованих систем контролю стану паперових грошових знаків.

Отримані результати дослідження демонструють можливість використання поляриметричного аналізу для об'єктивного оцінювання ступеня експлуатаційного

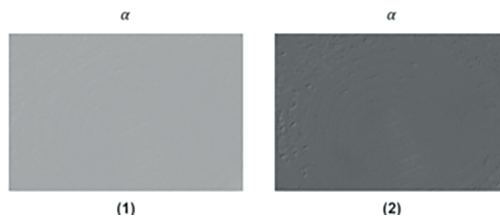
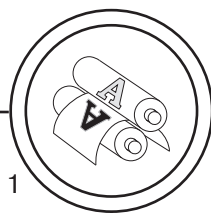


Рис. 5. Просторові карти азимута поляризації  $\alpha$  для банкнот різного ступеня зношення (1 — група 1; 2 — група 2)



Таблиця 1

Статистичні характеристики ступеня лінійної поляризації  $L_p$  для банкнот різного ступеня зношення

Група зразків	Середнє значення $L_p$	Стандартне відхилення	Коефіцієнт варіації, %
Незношені банкноти	0.42	0.05	11.9
Зношені банкноти	0.28	0.07	25.0

зношення паперових банкнот. Встановлено, що зміни волокнистої структури паперу, які виникають у процесі тривалої експлуатації грошових знаків, супроводжуються помітними змінами поляризаційних характеристик світла, зокрема зменшенням ступеня лінійної поляризації та зростанням просторової неоднорідності поляризаційних параметрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості створення оптичних систем автоматизованого контролю стану паперових банкнот на основі аналізу поляризаційних зображень. Використання параметрів Стокса та похідних поляризаційних характеристик дозволяє підвищити об'єктивність і точність визначення ступеня зношення паперових

носіїв порівняно з традиційними методами візуального контролю.

Запропонований підхід може бути застосований у банківських установах, сортувальних машинах для обробки грошових знаків та системах автоматичного контролю якості банкнот. Крім того, розроблений метод може використовуватися для дослідження стану інших паперових носіїв, зокрема цінних паперів, документів суворої звітності та поліграфічної продукції з підвищеними вимогами до захисту.

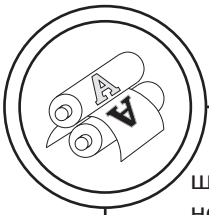
У табл. 2 наведено характеристичні ознаки (поляриметричні маркери) оцінки придатності банкнот.

Отримані результати можуть також слугувати основою для подальшого розвитку методів ма-

Таблиця 2

Поляриметричні маркери оцінки придатності банкнот та їх переваги

Критерій придатності (НБУ/ЄЦБ)	Поляриметричний маркер	Перевага методу
Рівень забруднення	Середнє значення ( $M_1$ )	Висока чутливість до мікроструктурного бруду
Жорсткість	Дисперсія азимута поляризації $\alpha$ ( $M_2$ )	Кількісна оцінка цілісності волокон
Наявність заломів	Контраст текстури $\alpha$	Детекція прихованих ліній згину
Справжність	Поляризаційна сигнатура фарби	Виявлення підробок на невластивому папері



шинного зору та автоматизованої обробки поляризаційних зображень у задачах контролю стану паперових матеріалів.

## Висновки

1. У роботі досліджено можливість використання поляриметричного методу для оцінювання ступеня експлуатаційного зношення паперових банкнот на основі аналізу поляризаційних зображень.

2. На основі експериментальних даних, отриманих для чотирьох станів лінійної поляризації ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ), побудовано карти параметрів Стокса, ступеня лінійної поляризації та азимута поляризації, що дозволяють характеризувати структурні особливості паперового матеріалу.

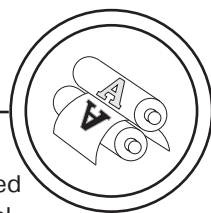
3. Проведений аналіз показав, що процес зношення паперових банкнот супроводжується зменшенням середнього значення ступеня лінійної поляризації та зростанням просторової неоднорідності поляризаційних характеристик.

4. Статистичний аналіз отриманих даних підтвердив наявність достовірних відмінностей між поляризаційними параметрами банкнот із різним ступенем зношення, що свідчить про інформативність запропонованого підходу для діагностики стану паперових носіїв.

5. Показано перспективність використання поляриметричного аналізу та параметрів Стокса для створення оптичних систем автоматизованого контролю стану паперових банкнот та інших паперових документів.

## References/Список використаної літератури

1. Tagat, A., Özmen, M., & Markowsky, G. (2024). Banknote Life in India: A Survival Analysis Approach. *J. Quant. Econ.*, 22, 519–545. <https://doi.org/10.1007/s40953-024-00390-1> [in English].
2. Luján-Ornelas, C., del C. Sternenfels, U. M., & Güereca, L. P. (2018). Life cycle assessment of Mexican polymer and high-durability cotton paper banknotes. *Science of The Total Environment*, Vol. 630, 409–421. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.177> [in English].
3. European Central Bank (2010). *Decision of 16 September 2010 on the authenticity and fitness checking and recirculation of euro banknotes (ECB/2010/14)*. Retrieved from <https://www.ecb.europa.eu/paym/cashprof/cashhand/recycling/html/fitness.en.html> [in English].
4. Lin, Z., He, Z., Wang, J. et al. Adaptive (2025). Rol-aware network for accurate banknote recognition using natural images. *Soft Comput*, 29, 4033–4043. <https://doi.org/10.1007/s00500-025-10649-1> [in English].
5. Kyrychok, T., Baglai, V., & Kyrychok, A. (6 February 2020). Optical methods of banknotes sorting for Ukrainian Hryvnia: results and problems. *Proc. SPIE 11369, Fourteenth International Conference on Correlation Optics*, 1136918. <https://doi.org/10.1117/12.2553936> [in English].
6. van der Horst, F., Snell, J., & Theeuwes, J. (2020). Finding counterfeited banknotes: the roles of vision and touch. *Cogn. Research*, 5, 40. <https://doi.org/10.1186/s41235-020-00236-3> [in English].
7. Macchia, A., Colasanti, I. A., Barbaccia, F. I., Zaratti, C., Franchino, G., Scarpelli, J., Damiano, M., & Valentini, F. (2025). Preservation of Money Art: Material Degradation and Evaluation of Biopolymer Coatings as Protective Strategies. *Appl. Sci.*, 15(10), 5355. <https://doi.org/10.3390/app15105355> [in English].



8. Jo, H. M., Lee, J. Y., & Kim, T. Y. (2024). Application of surface-modified carboxymethylated nanofibrillated cellulose as a strength enhancer for specialty paper. *BioResources*, 19(3), 5586–5598 [in English].

9. (2018). *Pro zatverdzhennia Pravyl vyznachennia platizhnykh oznak ta obminu banknot, rozminnykh ta obihovykh monet natsionalnoi valiuty Ukrainy Postanova Pravlinnia Natsionalnogo banku Ukrainy vid 03.12.2018 № 134* [On approval of the Rules for determining payment features and exchanging banknotes, change and circulation coins of the national currency of Ukraine. Resolution of the Board of the National Bank of Ukraine dated 03.12.2018 No. 134]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0134500-18#Text> [in Ukrainian].

10. Dobryanskiy, A., Kyrychok, T., Slotska, L., Ohirko, M., & Felde, Ch. (10 November 2025). Application of optical methods for the analysis of the physical condition of paper banknotes. *Proc. SPIE 13813, Seventeenth International Conference on Correlation Optics*, 1381333. <https://doi.org/10.1117/12.3093241> [in English].

11. Barbarić-Mikočević, Ž., Bates, I., Rudolf, M., & Plazonić, I. (2024). The Influence of Ultraviolet Radiation on the Surface Roughness of Prints Made on Papers with Natural and Bleached Hemp Fibers. *Fibers*, 12(12), 112. <https://doi.org/10.3390/fib12120112> [in English].

12. Glaser, J. A. (2014). Green money laundering. *Clean Techn Environ Policy*, 16, 675–680. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0751-6> [in English].

13. Kyrychok, T., Kyrychok, P., Havenko, S., et al. (2014). The influence of pressure during intaglio printing on banknotes durability. *Mechanika*, 20(3), 327–331. DOI:10.5755/j01.mech.20.3.7393 [in English].

14. Kyrychok, T., Korotenko, O., Talimonov, Y., & Kyrychok, A. (2023). Improving a method for determining the level of wear of the mark for people with visual impairments on Ukrainian hryvnia banknotes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(125)), 92–103. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287746> [in English].

15. Goldstein, D. H. (2011). *Polarized Light* (3rd ed.). New York: CRC Press [in English].

16. Angelsky, O. V., & Maksymyak, P. P. (1992). Optical diagnostics of slightly rough surfaces. *Applied Optics*, 31(1), 140–143 [in English].

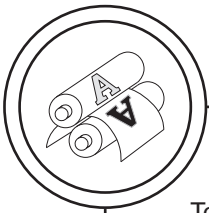
17. Sharma, S. K., & Somerford, D. J. (2006). *Light scattering by optically soft particles: theory and applications*. Berlin: Springer [in English].

18. Ossikovski, R., & Arteaga, O. (2014). Statistical meaning of the differential Mueller matrix of depolarizing homogeneous media. *Optics Letters*, 39(15), 4470–4473 [in English].

19. Oldenbourg, R. (1996). *A new view on polarization microscopy*. *Nature*, 381, 811–812 [in English].

20. Forbes, A., De Oliveira, M., & Dennis, M. R. (2021). Structured light. *Nature Photonics*, 15, 253–262 [in English].

\*Corresponding author: **Andrii Dobrianskyi**, postgraduate student, National Technical University of Ukraine ‘Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute’, assistant, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, a.dobrianskyi@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0003-1078-2376>.



**Tetiana Kyrychok**, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', t.kyrychok@kpi.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9639-5486>.

**Olena Korotenko**, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', gushcha.olena@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6439-1192>.

**Oleksandr Dubolazov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, a.dubolazov@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1051-2811>.

**Iryna Soltys**, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, i.soltys@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2156-7404>.

**Mykhailo Horskyi**, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, m.gorskiy@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6806-288X>.

**Oleksandr Ushenko**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, o.ushenko@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7015-7423>.

**Mykhailo Ohirko**, Ph.D. in Technical Sciences, assistant, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, m.ohirko@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0007-4444-0189>.

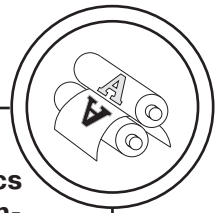
#### **About the author's contribution to the research**

*Conceptualization* (T. Yu. Kyrychok, O. H. Ushenko, O. V. Dubolazov); *methodology* (A. I. Dobrianskyi, I. V. Soltys, M. P. Horskyi); *software* (M. P. Horskyi, M. O. Ohirko); *verification* (O. V. Dubolazov, O. V. Korotenko); *formal analysis* (A. I. Dobrianskyi, O. V. Dubolazov); *research* (A. I. Dobrianskyi); *resources* (T. Yu. Kyrychok, O. V. Korotenko); *research administration* (O. H. Ushenko).

#### **Polarimetric Diagnostics of the Degree of Wear of Paper Banknotes Based on the Analysis of Stokes Image Parameters**

**This work investigates the potential of the polarimetric method for assessing the degree of wear in paper banknotes and determining changes in their internal structure during prolonged operational use. The objects of the study are banknote fragments with various levels of wear, differing in surface condition, fibrous layer density, and the extent of mechanical damage. Polarization images were obtained for four linear polarization states (0°, 45°, 90°, and 135°), allowing for a comprehensive characterization of the polarization properties of the investigated samples.**

**Based on the experimental data, maps of the Stokes parameters, the degree of linear polarization, and the polarization azimuth were calculated, reflecting the specific features of the optical anisotropy of the paper material. A comparative analysis**



of the mean values, variance, and other statistical characteristics of the polarization parameters was conducted for groups of banknotes with different degrees of wear.

It was established that the wear process is accompanied by a decrease in the degree of polarization, a transformation of the azimuthal structure, and a disruption of the spatial uniformity of the polarization maps, these effects are attributed to the degradation of the paper's fibrous structure, surface contamination, and the accumulation of microdefects. The results confirm the high sensitivity of the polarimetric approach to structural changes in paper media and can be utilized to develop optical methods for the automated condition assessment of banknotes, securities, accountable documents, and other paper-based materials.

Particular attention in this work is paid to the analysis of higher-order statistical moments (skewness and kurtosis) of the Stokes parameter distributions, which enabled the identification of hidden patterns in the structural degradation of the cellulose matrix. Such an integrated approach opens new possibilities for developing intelligent systems for authenticity recognition and assessing the operational suitability of documents based on machine learning, where the input data consist of feature vectors derived from the statistical characteristics of polarization maps.

**Keywords:** polarimetry; Stokes parameters; degree of linear polarization; paper banknotes; wear; image processing.

Надійшла до редакції/Received: 27.02.26

Рецензія/Peer review: 23.03.26

Опубліковано/Printed: 10.04.26