

УДК 678.7:069.11:546

DOI 10.32461/2226-3209.4.2025.351862

Цитування:

Андріанова О. Б., Третініченко В. А., Кожуховська В. Д. Аналіз елементного складу друкарського паперу: виявлення закономірностей та інтерпретація результатів дослідження. *Вісник Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв* : наук. журнал. 2025. № 4. С. 197–201.

Andrianova O., Tretinichenko V., Kozhukhovska V. (2025). Analysis of the Elemental Composition of Printing Paper: Identification of Regularities and Interpretation of Research Results. *National Academy of Managerial Staff of Culture and Arts Herald: Science journal*, 4, 197–201 [in Ukrainian].

Андріанова Олена Борисівна,

кандидатка хімічних наук,
директорка Бюро науково-технічної
експертизи «АРТ-ЛАБ»,
доцентка кафедри
мистецтвознавчої експертизи
Національної академії керівних кадрів
культури і мистецтв
<https://orcid.org/0000-0003-3835-6312>
andria.elena@gmail.com

Третініченко Вікторія Аркадійвна,

кандидатка хімічних наук,
старша викладачка кафедри хімії
Національного університету
«Києво-Могилянська академія»
<https://orcid.org/0000-0002-3731-0091>
tretinichenko@ukma.edu.ua

Кожуховська Варвара Дмитрівна,
здобувачка

Національного університету
«Києво-Могилянська академія»
<https://orcid.org/0009-0000-5162-9536>
v.kozhukhovska@ukma.edu.ua

АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ДРУКАРСЬКОГО ПАПЕРУ: ВИЯВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи полягала у виявленні закономірностей елементного складу друкарського паперу різних хронологічних періодів та інтерпретації отриманих результатів для вдосконалення підходів до атрибуції та автентифікації об'єктів на паперовій основі. **Методологія дослідження** ґрунтувалася на загальнонауковому підході, що передбачав системне використання теоретичних методів (аналіз, дедукція, індукція, узагальнення) у поєднанні з емпіричними дослідженнями з використанням сучасних неструктурних фізико-хімічних методів. **Наукова новизна** статті: вперше встановлені закономірності елементного складу друкарського паперу кінця XIX – початку XXI ст., виявлені характерні хімічні елементи та інтерпретоване їхнє можливе походження залежно від технології виробництва та використаних наповнювачів; визначено діагностичні маркери, які можуть бути використані для попередньої ідентифікації каоліну в паперовій масі методом рентгенофлуоресцентного аналізу. **Висновки.** Встановлено, що характерними хімічними елементами у складі друкарського паперу XIX–XX ст. є залізо, кальцій, калій, цинк та мідь, для зразків другої половини XX ст. є типовою наявність титану, зумовлена використанням як наповнювачів каолінів з вторинних родовищ. Показано, що в складі паперу XXI ст. кальцій стає домінуючим елементом, що пов'язано із застосуванням карбонату кальцію як основного наповнювача. Доведено ефективність використання рентгенофлуоресцентного аналізу для встановлення елементного складу паперу та доцільність його поєднання з інфрачервоною спектроскопією для визначення природи наповнювачів. Результати дослідження створюють підґрунтя для формування бази даних елементного складу паперу різних хронологічних періодів, що сприятиме розвитку науково обґрунтованих методів автентифікації об'єктів культурної спадщини на паперовій основі.

Ключові слова: друкарський папір, елементний склад, рентгенофлуоресцентний аналіз, інфрачервона спектроскопія з Фур'є-перетворенням, каолін, наповнювачі.

Andrianova Olena, Candidate of Chemical Sciences, Director of the Bureau of Scientific and Technical Expertise “ART-LAB”, Associate Professor of the Department of Art History Expertise, National Academy of Culture and Arts

© Андріанова О. Б., 2025. CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

© Третініченко В. А., 2025. CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

© Кожуховська В. Д., 2025. CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Management; *Tretinichenko Viktoriia*, Candidate of Chemical Sciences, Senior Lecturer, Department of Chemistry, National University of Kyiv-Mohyla Academy; *Kozhukhovska Varvara*, Student, Department of Chemistry, National University of Kyiv-Mohyla Academy

Analysis of the Elemental Composition of Printing Paper: Identification of Regularities and Interpretation of Research Results

The purpose of the article is to reveal regularities in the elemental composition of printing paper across different chronological periods and to interpret the results obtained to refine approaches to the attribution and authentication of paper-based objects. The research methodology is based on a general scientific approach, involving the systematic use of theoretical methods (analysis, deduction, induction, and generalisation) combined with empirical studies employing modern non-destructive physico-chemical methods. **Scientific novelty.** For the first time, regularities in the elemental composition of printing paper dating from the late 19th to the early 21st century have been identified, key chemical elements have been determined, and their possible origins have been interpreted based on production technology and the fillers employed. Diagnostic markers have been defined that can be used for the preliminary identification of kaolin in paper pulp using X-ray fluorescence analysis. **Conclusions.** It has been established that the elemental composition of printing papers from the 19th and 20th centuries is characterised by the presence of iron, calcium, potassium, zinc, and copper, while titanium is typical of samples from the second half of the 20th century, attributable to the use of kaolins from secondary deposits as fillers. It has been shown that in 21st-century papers, calcium becomes the dominant element due to the widespread use of calcium carbonate as the primary filler. The study demonstrates the effectiveness of X-ray fluorescence analysis for determining the elemental composition of paper and the relevance of complementing it with infrared spectroscopy to identify the nature of the fillers. The results provide a foundation for developing a database of the elemental composition of papers from different chronological periods, thereby facilitating the development of scientifically robust methods for authenticating paper-based cultural heritage objects.

Keywords: printing paper, elemental composition, X-ray fluorescence analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, kaolin, fillers.

Актуальність теми дослідження. Об'єкти на паперовій основі – документи, рукописні та друковані видання, графічні твори, відбитки та малюнки – є важливими свідченнями історичного, інтелектуального та культурного розвитку людства. У сучасній дослідницькій практиці дедалі більшого значення набуває застосування неруйнівних фізико-хімічних методів для встановлення технології виготовлення, визначення походження та часу створення паперу, що є необхідним для вирішення завдань судової, криміналістичної та мистецтвознавчої експертизи, а також для розробки консерваційно-реставраційних методик. Склад паперу залежить не лише від часу виготовлення, а й від його функціонального призначення (рисувальний, друкарський, писальний тощо), що зумовлює необхідність комплексного підходу до аналізу. Сучасні неруйнівні методи, зокрема рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА), дозволяють отримати детальну інформацію про елементний склад паперу без пошкодження об'єктів культурної спадщини. Це робить дослідження закономірностей варіацій елементного складу паперу різних хронологічних періодів надзвичайно актуальним для атрибуції, автентифікації та збереження історичних артефактів.

Аналіз досліджень і публікацій. Рентгенофлуоресцентний спектральний аналіз застосовується в експертизі документів та творів графіки з 1970-х р. [1], проте, протягом наступних десятиліть використання методу було обмеженим. З початку ХХІ ст. основна увага науковців спрямована на виявлення

закономірностей у складі історичного паперу (основи рисунків, фотографії, папір для друку тощо) та інтерпретації його елементного складу [2; 5; 6; 10; 11]. Незважаючи на значні можливості та широкі перспективи застосування методу РФА, його потенціал при проведенні досліджень книг, рукописних та друкованих видань залишається недостатньо реалізованим – результати аналізу зразків паперу ХV – першої половини ХХ ст. наведені лише у поодиноких публікаціях [3; 7; 9]

Мета дослідження – встановлення елементного складу друкарського паперу, виготовленого протягом кінця ХІХ–початку ХХ ст., виявлення закономірностей та інтерпретація отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. Для виявлення закономірностей у змінах складу друкарського паперу були проаналізовані аркуші форзаців та книжкових блоків таких видань кінця ХІХ – початку ХХІ ст.: 1) Замыцкий А. Д. Слова, реченія и разговоры на языкахъ русскомъ, італіанском, французомъ и немецкомъ. Типографія Тренке и Фюсно, 1880 р.; 2) Перельман В. І. Короткий довідник хіміка. Державне науково-технічне видавництво хімічної літератури, 1951 р.; 3) Шевченко Т. Г. Кобзар. Державне видавництво художньої літератури, 1961 р.; 4) Казицина Л. А., Куплетська Н. Б. Застосування УФ-, ІЧ- та ЯМР-спектроскопії в органічній хімії. Видавництво «Вища школа», 1971 р.; 5) Виниченко В. К. Відродження нації. Видавництво політичної літератури України, 1990 р.; 6) Загребельний П. А. Роксолана. Видавництво «Фоліо», 2002 р.

Дослідження елементного складу паперу виконували методом РФА на спектрометрі ElvaX-ART (ТОВ «Елватех», Україна), оснащеного рентгенівською трубкою з вольфрамовим анодом, що дозволяє визначати хімічні елементи з атомними номерами від 16 (сірка) до 92 (уран). Обробка отриманих спектрів та ідентифікація хімічних елементів у складі паперу здійснювалися автоматично методом безеталонного аналізу. Для встановлення складу наповнювачів використовували метод інфрачервоної

спектроскопії з Фур'є-перетворенням (ATR-FTIR), дослідження виконували на спектрометрі Vertex70 (Bruker, Німеччина). Ідентифікація наповнювачів у складі паперу відбувалася шляхом порівняльного аналізу з FTIR-спектрами еталонів із власної бази Бюро науково-технічної експертизи «АРТ-ЛАБ».

Визначені методом РФА хімічні елементи у складі аркушів форзаців та книжкових блоків друкованих видань кінця XIX–початку XXI ст. наведені у таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Вміст хімічних елементів (%) у складі форзацних аркушів досліджених видань

№	Рік видання	Виявлені хімічні елементи, %								
		Fe	Ca	Ti	K	Cu	Zn	Rb	Zr	Sr
1	1880	41,21	20,23	<0,01	31,40	0,80	3,47	1,18	<0,01	<0,01
2	1951	34,47	8,98	47,32	3,30	0,72	1,46	<0,01	1,36	<0,01
3	1961	36,94	10,62	38,77	6,82	2,02	4,16	<0,01	0,66	<0,01
4	1971	31,35	14,49	44,95	<0,01	1,92	3,20	<0,01	2,11	1,56
5	1990	47,55	10,73	31,23	6,57	<0,01	3,29	<0,01	0,83	<0,01
6	2002	0,89	97,77	<0,01	0,68	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,323

Таблиця 2

Вміст хімічних елементів (%) у складі аркушів книжкового блоку досліджених видань

№	Рік видання	Виявлені хімічні елементи, %							
		Fe	Ca	Ti	K	Cu	Zn	Zr	
1	1880	29,32	35,17	<0,01	22,86	3,37	2,96	<0,01	
2	1951	32,31	18,54	43,01	<0,01	1,59	3,31	1,07	
3	1961	26,96	23,47	30,79	6,27	10,37	1,26	<0,01	
4	1971	38,67	15,12	28,68	14,30	0,78	2,40	<0,01	
5	1990	42,60	5,26	46,32	1,00	0,81	4,50	<0,01	
6	2002	22,29	70,67	<0,01	<0,01	<0,01	6,92	<0,01	

У більшості зразків аркушів форзаців та книжкових блоків основними елементами є залізо, кальцій, титан та калій, як домішки виявлені мідь та цинк, тож їх можна класифікувати як типові елементи у складі друкарського паперу.

Наявність Fe може бути пов'язана із значним вмістом сполук заліза у складі волокон рослинної та деревної целюлози [2; 12]. Крім того, через здатність целюлози зв'язувати йони перехідних металів, сполуки заліза можуть адсорбуватися волокнами паперу з води, що використовується у виробничому процесі, або потрапляти до складу паперової маси внаслідок утворення продуктів корозії при зношуванні виробничого обладнання [2, 214; 10, 55; 12]. Дослідження методом РФА показали, що вміст заліза варіюється від 22,3% до 42,6% у складі паперу аркушів книжкового блоку та від 21 до 48% у зразках 1–5 форзацних аркушів. Найменший вміст Fe у зразку 6 пояснюється, очевидно, значним вмістом неорганічного кальційвмісного наповнювача у паперовій масі.

Вміст Ca може бути обумовлений декількома факторами, а саме мінеральним складом води, використанням вапна у процесах

виробництва, додаванням наповнювачів тощо [2, 214; 10, 54–55]. У складі форзаців та аркушів книжкового блоку вміст кальцію варіюється від 9 до 20% та від 5 до 35% відповідно, що наряду з вмістом заліза дозволяє стверджувати про переважне походження сполук кальцію з рослинної напівмаси. Винятком є зразок 6, де Ca присутній у масовій концентрації близько 98% і обумовлений наявністю карбонату кальцію як наповнювача (це було підтверджено методом ІЧ-спектроскопії). Відомо [8], що природний або синтетичний карбонат кальцію використовується для підвищення оптичних та механічних властивостей паперу і сприяє зменшенню його кислотності, є домінуючим наповнювачем у паперовій промисловості в Європі та США з 1960-х та 1990-х рр. відповідно.

У складі більшості зразків паперу виявлений калій, його вміст у аркушах книжкового блоку варіюється від 1% до 23%, у форзацних аркушах – від 3% до 31%. Згідно з літературними даними [2, 215; 10, 55] основними причинами вмісту калію у папері є використання гідроксиду калію (KOH) у виробничих процесах для усунення жирів

домішок та застосування каоліну як наповнювача. На наявність каоліну також може вказувати присутність у папері домішок сполук рубідію та цирконію [1, 207–208], що були виявлені у зразках 1, 2 та 4.

Титан був виявлений у зразках 2–5 друкарського паперу, виготовлених у другій половині XX ст. – вміст Ti варіюється від 31 до 43% у форзацних аркушах та від 29 до 46% у аркушах паперового блоку. Наявність Ti може пояснюватися використанням титанового білила як наповнювача [2, 216], сполуки титану також можуть входити до складу каолінів [1; 4, 18; 13], що використовуються при виготовленні паперу. З метою інтерпретації походження сполук титану у друкарському папері було проведено аналіз методом ATR-FTIR. Отримані експериментальні дані свідчать про значний вміст каоліну у складі аркушів форзаців та книжкових блоків зразків 1–4. Інтенсивність смуг поглинання каоліну в ІЧ-спектрах вказаних зразків прямо пропорційна процентному вмісту Ti, визначеному методом РФА, що підтверджує використання при виробництві паперу каолінів із вторинних родовищ [1; 4, 18] і спростовує наявність титанового білила як наповнювача. Відсутність кореляції між вмістом хімічних елементів та часом виготовлення зразків друкарського паперу другої половини XX ст. може вказувати на стандартизацію процесів з метою здешевлення виробництва та підвищення якості паперової продукції.

У складі аркушів форзацу та паперового блоку зразка 1 методом ATR-FTIR ідентифіковані домішки каоліну, що за відсутності титану і наявністю калію та домішок рубідію у зразку свідчить про використання каолінів з первинних родовищ [1; 4, 18] як наповнювачів.

Мідь, цинк та свинець є токсичними металами, які потрапляють до рослин з ґрунтів і забрудненої води і здатні накопичуватися протягом періоду їхнього росту [12]. Значний вміст міді, цинку та свинцю у складі паперу може також пояснюватися особливостями виробництва [2, 214–215; 10, 55; 12], а саме, використанням мідного чи оцинкованого обладнання, додаванням цинкового білила (ZnO), літопону ($\text{BaSO}_4 \cdot \text{ZnS}$), сульфід цинку (ZnS) або свинцевого білила ($2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$) як наповнювачів до паперової маси. Вміст Zn у аркушах форзаців не перевищує 5%, в аркушах книжкового блоку варіюється від 1 до 7%. Мідь у більшості зразків не ідентифікована або виявлена у домішках (до 3%); винятком є зразок 3 аркуша книжкового блоку, що може пояснюватися особливостями виробництва паперу і потребує подальших досліджень.

Незначний вміст міді та цинку в інших досліджених зразках, очевидно, пояснюється наявністю цих елементів у складі целюлозних волокон. Свинець у складі всіх аркушів ідентифікований у мікродомішках (менше 1%), що узгоджується з літературними даними [2, 215].

Наукова новизна. Уперше встановлено елементний склад друкарського паперу видань кінця XIX–початку XXI ст., виявлені характерні хімічні елементи та визначено їхнє можливе походження залежно від технології виробництва та використаних наповнювачів. Доведено пріоритетне використання каолінів з вторинних родовищ як наповнювачів паперу другої половини XX ст. Визначено діагностичні маркери (наявність K, Ti, Zr та Rb), які можуть бути використані для попередньої ідентифікації каоліну у паперовій масі методом РФА.

Висновки. У результаті проведеного дослідження визначено хімічні елементи, які є типовими для друкарського паперу кінця XIX–початку XXI ст., та запропонована інтерпретація їхнього походження. Показано, що у складі зразків XIX–XX ст. відзначається переважний вміст Fe, Ca, та K, як домішки присутні Zn та Cu; для паперу XX ст. є типовою наявність Ti, обумовлена використанням каолінів з вторинних родовищ як наповнювачів; зафіксовано перехід до застосування карбонату кальцію як наповнювача друкарського паперу XXI ст. Отримані результати формують підґрунтя для створення референтної бази елементного складу паперу, що розширює можливості атрибуції та автентифікації об'єктів на паперовій основі.

Література

1. Андріанова О. Б., Біскулова С. О. Інтерпретація походження сполук титану у складі паперу XIX – XX ст. за результатами дослідження фізико-хімічними методами. *Мистецька культура: історія, теорія, методологія* : XII Міжнар. наук. конф. (Львів, 22 лист. 2024 р.). Львів, 2024. С. 205–210.
2. Андріанова О., Біскулова С., Фесенко О. Дослідження паперу сучасними методами недеструктивного аналізу та визначення часу його виробництва. *Вісник Львівського університету. Серія хімічна*. 2016. Вип. 57, Ч. 1. С. 212–218.
3. Albertin F., Balliana E., Pizzol G., Colavizza G., Zendri E., Raines D. Printing materials and technologies in the 15th–17th century book production: An undervalued research field. *Microchemical Journal*. 2018. Vol. 138. P. 147–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.12.010>.
4. Beazley K. Mineral fillers in paper. *The Paper Conservator*. 1991. Vol. 15, № 1. P. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/03094227.1991.9638393>.

5. Bicchieri M., Biocca P., Caliri C., Romano F. P. New discoveries on Leonardo da Vinci drawings. *Microchemical Journal*. 2020. Vol. 157. Article 104844. DOI: 10.1016/j.microc.2020.104844.

6. Čechák T., Kopecká I., Trojek T., Štanzel T., Bártošová H. Application of X-ray fluorescence in an investigation of photographic heritage. *Radiation Physics and Chemistry*. 2015. Vol. 116. P. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.05.015>.

7. Fierascu I., Fierascu R. C., Stirban A., Panaitescu D. M., Nicolae C. A., Raditoiu V., Zgarcu M. S., Leahu A. C. Chemical and mineral characterization of Romanian book paper materials (XVII–XIXth century). *Microchemical Journal*. 2020. Vol. 152. Article 104307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019>.

8. Hubbe M. A., Gill R. A. Fillers for papermaking: A review of their properties, usage practices, and their mechanistic role. *BioResources*. 2016. Vol. 11, № 1. P. 2886–2963. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-075067838-4/50020-8>.

9. Manso M., Carvalho M. L. Elemental identification of document paper by X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2007. Vol. 22, № 2. P. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.1039/B608361G>.

10. Manso M., Carvalho M. L., Queralt I., Vicini S., Princi E. Investigation of the composition of historical and modern Italian papers by energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy energy dispersive spectrometry (SEM-EDS). *Applied Spectroscopy*. 2011. Vol. 65, № 1. P. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.1366/10-06105>.

11. Masruchin N., Soo-Jeong Shin. Inorganics and printing image analysis by micro X-ray fluorescence analysis in base paper and printed ink. *Journal of Korea TAPPI*. 2024. Vol. 56, № 4. P. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.7584/JKTAPPI.2024.8.56.4.5>.

12. Shahani C. J., Hengemihle F. H. Influence of copper and iron on permanence of paper. *Historic Textile and Paper Materials: Conservation and Characterization* / Eds. H. L. Needles, S. H. Zeronian. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1986. P. 387–410. DOI: 10.1021/ba-1986-0212.ch022.

13. Yahaya Sh., Jikan S. S., Badarulzaman N. A., Adamu A. D. Chemical composition and particle size analysis of kaolin. *Traektoriâ Nauki = Path of Science*. 2017. Vol. 3, № 10. P. 1001–1004. DOI: <https://doi.org/10.22178/pos.27-1>.

References

1. Andrianova, O. B., & Biskulova, S. O. (2024). Interpretation of the origin of titanium compounds in 19th–20th century paper based on physico-chemical methods. *Proceedings from The 12th International Scientific Conference ‘Art Culture: History, Theory, Methodology’*. (pp. 205–210). Lviv [in Ukrainian].

2. Andrianova, O., Biskulova, S., & Fesenko, O. (2016). Investigation of paper using modern non-

destructive methods and determination of its production date. *Bulletin of Lviv University. Chemistry Series*, 57(1), 212–218 [in Ukrainian].

3. Albertin, F., Balliana, E., Pizzol, G., Colavizza, G., Zendri, E., & Raines, D. (2018). Printing materials and technologies in the 15th–17th century book production: An undervalued research field. *Microchemical Journal*, 138, 147–153 [in English].

4. Beazley, K. (1991). Mineral fillers in paper. *The Paper Conservator*, 15(1), 17–27 [in English].

5. Bicchieri, M., Biocca, P., Caliri, C., & Romano, F. P. (2020). New discoveries on Leonardo da Vinci drawings. *Microchemical Journal*, 157, 104844 [in English].

6. Čechák, T., Kopecká, I., Trojek, T., Štanzel, T., & Bártošová, H. (2015). Application of X-ray fluorescence in an investigation of photographic heritage. *Radiation Physics and Chemistry*, 116, 8–13 [in English].

7. Fierascu, I., Fierascu, R. C., Stirban, A., Panaitescu, D. M., Nicolae, C. A., Raditoiu, V., et al. (2020). Chemical and mineral characterization of Romanian book paper materials (XVII–XIXth century). *Microchemical Journal*, 152, 104307 [in English].

8. Hubbe, M. A., & Gill, R. A. (2016). Fillers for papermaking: A review of their properties, usage practices, and their mechanistic role. *BioResources*, 11(1), 2886–2963 [in English].

9. Manso, M., & Carvalho, M. L. (2007). Elemental identification of document paper by X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 22(2), 164–170 [in English].

10. Manso, M., Carvalho, M. L., Queralt, I., Vicini, S., & Princi, E. (2011). Investigation of the composition of historical and modern Italian papers by energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy energy dispersive spectrometry (SEM-EDS). *Applied Spectroscopy*, 65(1), 52–59 [in English].

11. Masruchin, N., & Soo-Jeong Shin. (2024). Inorganics and printing image analysis by micro X-ray fluorescence analysis in base paper and printed ink. *Journal of Korea TAPPI*, 56(4), 5–13 [in English].

12. Shahani, C. J., & Hengemihle, F. H. (1986). Influence of copper and iron on permanence of paper. *Historic textile and paper materials: Conservation and characterization*. H. L. Needles & S. H. Zeronian (Eds.). American Chemical Society [in English].

13. Yahaya, Sh., Jikan, S. S., Badarulzaman, N. A., & Adamu, A. D. (2017). Chemical composition and particle size analysis of kaolin. *Traektoriâ Nauki = Path of Science*, 3(10), 1001–1004 [in English].

Стаття надійшла до редакції 03.11.2025
Отримано після доопрацювання 05.12.2025
Прийнято до друку 15.12.2025
Опубліковано 29.12.2025