

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО И УПАКОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF PRINTING AND PACKING MANUFACTURES

УДК 665.947.834/667.5.033

**Х. А. Бабаханова¹, Д. Ч. Равшанзода², Н. Ж. Садриддинова¹,
М. А. Бабаханова³, И. Г. Громыко⁴**

¹Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности (Республика Узбекистан)

²Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими
(Республика Таджикистан)

³Ташкентский государственный технический университет ГУ «Фан ва тараккият»
(Республика Узбекистан)

⁴Белорусский государственный технологический университет

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БУМАГИ

В статье изучен элементный состав и структура образцов бумаги, изготовленных на основе макулатуры, а также бумаги, содержащей карбонат кальция в качестве ведущего сырья. Бесперебойное протекание технологического процесса и качество печати зависят от свойств бумаги. Несовпадение их нормативным данным приводит к различному давлению в зоне печатного контакта, в результате чего из-за неравномерного переноса краски высокая графическая точность и цветопроизводство не обеспечиваются. Для изучения элементного состава и структуры бумаги использован метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), позволяющий при высоком разрешении (от 1 до 10 нм) и глубине резкости одновременно получать четкие изображения объектов с неровными или сложными поверхностями. В сочетании с детектором энергии дисперсионного рентгеновского излучения (ЭДС) обеспечивается возможность проведения химического анализа. Бумаги из карбоната кальция и полиэтилена имеют плотную структуру без волокон. Сравнение элементного состава показал, что в исследуемых образцах выявлены высокий уровень интенсивности сигнала рентгеновского излучения таких элементов, как углерод, кислород, меньший уровень интенсивности кальция, алюминия, кремния, меди, что подтверждает содержание других веществ, добавленных для улучшения свойств. Содержание элемента кремния говорит о том, что в качестве наполнителя использован диоксид кремния (кремнезем), а это улучшает поверхностные и сорбционные свойства бумаги за счет формирования защитного покрытия. У образца бумаги из карбоната кальция наблюдается высокий уровень интенсивности кальция, потом углерода и кислорода, что подтверждает наличие карбоната кальция. Применение метода СЭМ и ЭДС-анализа для изучения элементного состава и структуры бумаги является перспективным, так как появляется возможность оперативно и с высокой точностью идентифицировать составы бумаги из различного сырья. А это позволит предопределить поверхностные и сорбционные свойства и их влияние на качество печати.

Ключевые слова: элементный состав бумаги, метод СЭМ и ЭДС-анализ, картирование элементов, макулатура, карбонат кальция.

Для цитирования: Бабаханова Х. А., Равшанзода Д. Ч., Садриддинова Н. Ж., Бабаханова М. А., Громыко И. Г. Элементный состав различных видов бумаги // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт-и медиа-технологии. 2026. № 1 (303). С. 5–15.

DOI: 10.52065/2520-6729-2026-303-1.

**Kh. A. Babakhanova¹, D. Ch. Ravshanzoda², N. J. Sadriddinova¹,
M. A. Babakhanova³, I. G. Gromyko⁴**

¹Tashkent Institute of Textile and Light Industry (Republic of Uzbekistan)

²Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi (Republic of Tajikistan)

³Tashkent State Technical University SE “Fan va taraqqiyot” (Republic of Uzbekistan)

⁴Belarusian State Technological University

ELEMENTAL COMPOSITION OF DIFFERENT TYPES OF PAPER

The article studies the elemental composition and structure of paper of various compositions. Uninterrupted flow of the technological process and print quality depend on the properties of the paper. Inconsistency of the properties with the standard data lead to different pressure in the printing contact zone, as a result of which, due to uneven transfer of paint, high graphic accuracy and color reproduction are not ensured. In the work, the objects of study were papers made of waste paper, paper made of waste paper with the addition of 30% cellulose, and paper made of calcium carbonate. Method. To study the elemental composition and structure of paper, the method of scanning electron microscopy (SEM) was used, which allows, at high resolution (from 1 to 10 nm) and depth of field, to simultaneously obtain clear images of objects with uneven or complex surfaces. In combination with a detector of energy dispersive X-rays (EDS), it is possible to carry out chemical analysis. The distribution and quantitative content of elements were estimated from the SEM images of cross sections obtained on a JEOL JSM-IT200 scanning electron microscope. The SEM images clearly show the close interweaving of split fibers and the presence of such elements as carbon, oxygen, aluminum and calcium. Calcium carbonate and polyethylene papers have a dense structure without fibers. Comparison of the elemental composition showed that the studied papers have a high level of intensity of the X-ray signal of such elements as carbon, oxygen, a lower level of intensity of calcium, aluminum, silicon, copper, which confirms the content of other substances added to improve the properties of paper. The content of silicon indicates that silicon dioxide (silica) is used as a filler, which improves the surface and sorption properties of paper due to the formation of a protective coating. The calcium carbonate paper sample has a high level of intensity of calcium, then carbon and oxygen, which confirms the presence of calcium carbonate. Paper sample 4 is entirely made of calcium carbonate with the addition of polyethylene, so the micrographs of the mapping do not contain copper elements present in natural water and plant fibers. In cellulose papers, the average value of the atomic mass of the oxygen element is 44.48%, and carbon 54.59%. The composition of calcium carbonate paper has an increased calcium content of an average of 9.54, while in cellulose papers it is 0.48, which is 20 times more. Practical significance. The use of the SEM and EDS analysis method to study the chemical composition and structure of paper is promising, since it becomes possible to quickly and accurately identify the compositions of paper from various raw materials, which will allow predetermining their surface and sorption properties and their effect on printing quality.

Keywords: elemental composition of paper, SEM and EDS analysis, elemental mapping, waste paper, calcium carbonate.

For citation: Babakhanova Kh. A., Ravshanzoda D. Ch., Sadriddinova N. J., Babakhanova M. A., Gromyko I. G. Elemental composition of different types of paper. *Proceedings of BSTU, issue 4, Print and Mediatechnologies*, 2026, no. 1 (303), pp. 5–15 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6729-2026-303-1.

Введение. Бурное развитие полиграфической отрасли объясняется растущим спросом на различные виды печатной продукции. Наличие современной техники и технологии способствуют оперативному выпуску продукции. Однако широкий спектр используемых полиграфических материалов из-за различия их свойств осложняет протекание технологического печатного процесса, что требует тщательного индивидуального подбора материалов в зависимости от сюжета запечатываемого изображения и технических параметров печатной машины. Стабильность качества печати изображения – графическая точность, оптическая плотность, цветопроизведение и другое, а также бесперебойное протекание технологического процесса обеспечиваются при правильном использовании вида запечатываемого материала. При выборе желательно учитывать их поверхностные свойства и

толщину, что является непостоянным ввиду разнообразия композиционного бумажного состава. Несоответствие этих свойств нормативным данным приводит к пятнистости оттиска из-за неравномерного переноса краски, так как давление в зоне печатного контакта различно.

Таким образом, исследование химического состава и структуры бумаги, их влияние на печатные свойства является актуальным и представляет практический интерес.

В течение последних десятилетий для анализа состава и структуры материалов в разных областях науки и производства широко применяется сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) [1–12]. К преимуществам современных СЭМ относятся: высокое разрешение (от 1 до 10 нм) и глубина резкости, которая позволяет одновременно получать четкие изображения объектов с неровными или сложными поверхностями. Удобство и простота подготовки образца, простая интерпретация изображения обеспечиваются благодаря эффекту трехмерного восприятия. СЭМ позволяет получать изображения с минимальным пространственным развитием, которые передают не только форму и топографию поверхности, но и внутреннюю структуру. В сочетании с детектором энергии дисперсионного рентгеновского излучения (ЭДС) СЭМ обеспечивает возможность проведения химического анализа. Это позволяет определять элементы, присутствующие на поверхности.

СЭМ используется для анализа материалов различных отраслей, в том числе и полиграфической. В работе [13] изучено распределение элементов печатной краски на поверхности бумаги, что помогает проанализировать ее микроструктуру. Как известно, бумага состоит из волокон целлюлозы, и СЭМ может показать, как такие волокна расположены на поверхности. Это важно для определения плотности, пористости и текстуры бумаги, которые напрямую влияют на механические и сорбционные свойства (например, прочность, гибкость и водопоглощение).

Структура поверхности бумаги имеет немаловажное значение при печати. Именно от нее зависит адгезия краски и чернил, впитываемость жидкости, а значит и качество печати. Бумага с высокой пористостью будет интенсивнее впитывать краску по сравнению с более плотными сортами бумаги.

Целью настоящей работы является изучение химического и количественного элементного состава бумаги при применении СЭМ и ЭДС-анализа.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) получить СЭМ-изображения для определения поверхностной структуры и элементного состава поверхности бумаги методом СЭМ и ЭДС-анализа;
- 2) исследовать степень влияния композиционного состава на поверхностную структуру бумаги;
- 3) изучить свойства бумаги и предложить рекомендации по применению.

Основная часть. В предоставленной работе использован современный растровый электронный микроскоп производства JEOL (Япония) серии JSM-IT200, оборудованный электронно-оптической системой, что позволяет получать оптическое изображение с высоким пространственным разрешением (рис. 1).

В конструкции JSM-IT200 имеются вакуумная система и источник электронов, блок электромагнитных линз, устройство формирования изображения. На поверхность исследуемого образца направляется пучок электронов, в результате возникают отраженные и вторичные электроны, а также фотоны, регистрируемые соответствующими детекторами. Используемый рентгеновский энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) позволяет проводить элементный анализ, получать карты распределения концентрации элементов, данные о химическом составе и морфологии микроструктуры поверхности массивных образцов.



Рис. 1. Общий вид электронного сканирующего микроскопа серии JSM-IT200

Объектами исследования являются бумаги из макулатуры, из макулатуры с добавлением 30% целлюлозы и бумаги из карбоната кальция (табл. 1). Свойства бумаги из карбоната кальция, производимой на СП Fergana stone paper company в Фергане (республики Узбекистан), исследованы авторами ранее [14–15].

Таблица 1. Состав исследуемых бумаг

Составные компоненты	Масса, г/м ²
1. Макулатура + АКД эмульсия, канифольный клей	150 ± 2
2. 30% целлюлозы + макулатура + АКД эмульсия, канифольный клей	117 ± 2
3. 30% целлюлозы + макулатура + АКД эмульсия, канифольный клей	132 ± 2
4. Из карбоната кальция	75 ± 2

В результате анализа на растровом электронном микроскопе JEOL серии JSM-IT200 получены СЭМ-изображения для исследуемых бумаг (рис. 2–6).

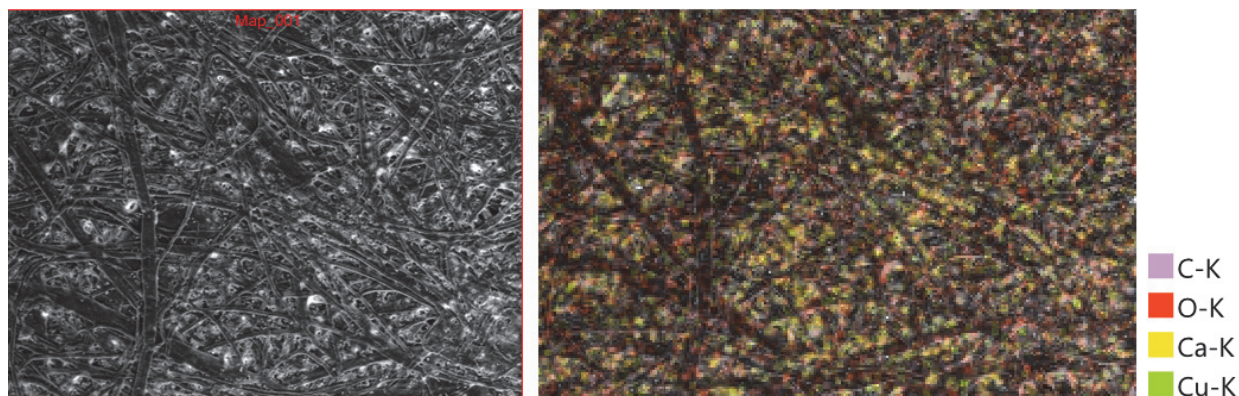


Рис. 2. СЭМ-изображения поперечных срезов бумаги офсетной при глубине 100 мкм

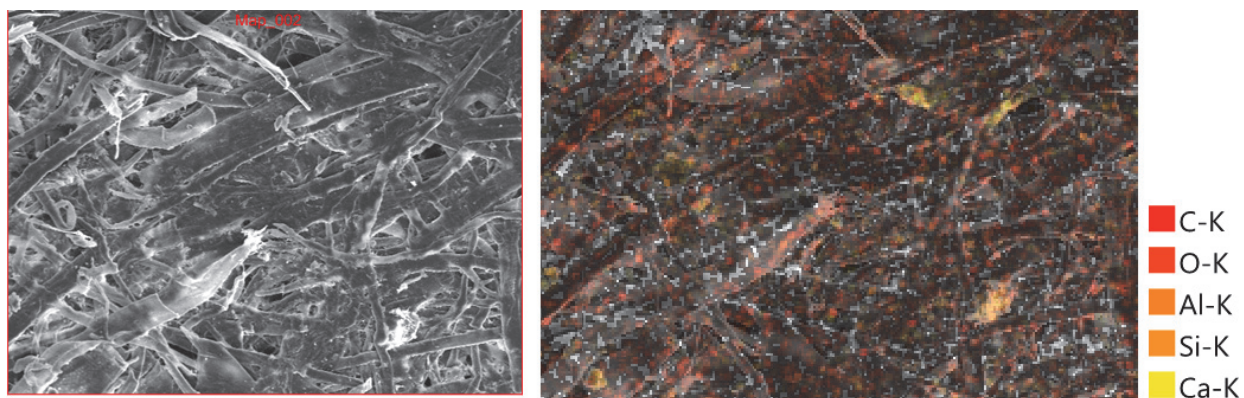


Рис. 3. СЭМ-изображения поперечных срезов образца бумаги № 1 из 100% макулатуры

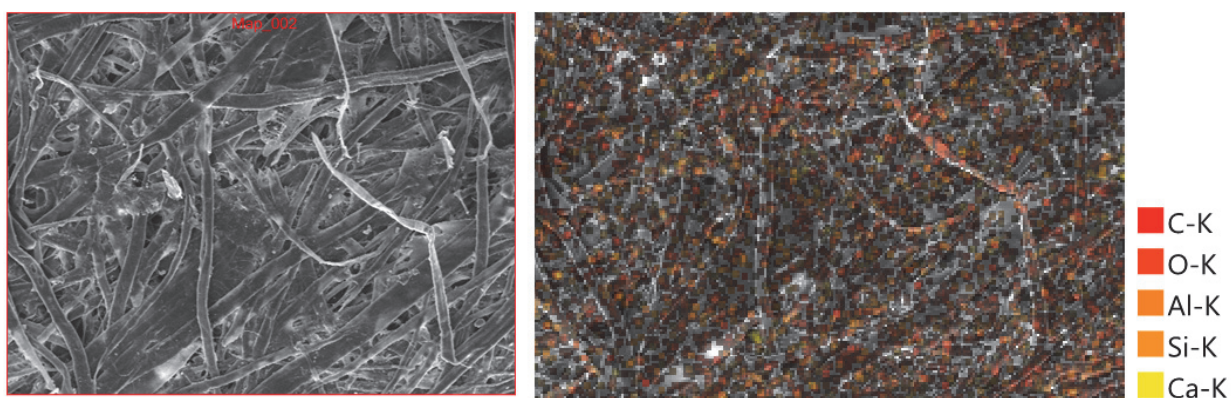


Рис. 4. СЭМ-изображения поперечных срезов образца бумаги № 2 + 70% макулатуры

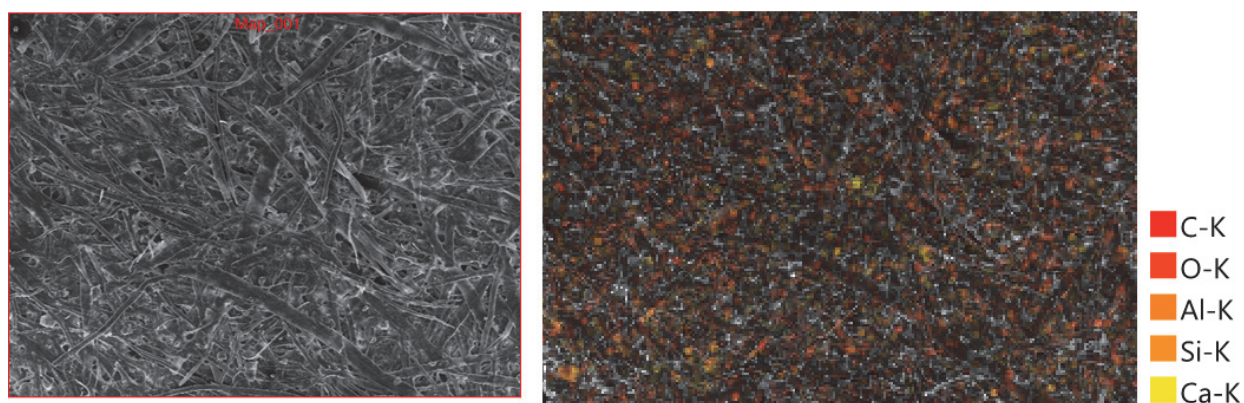


Рис. 5. СЭМ-изображения поперечных срезов образца бумаги № 3 + 70% макулатуры

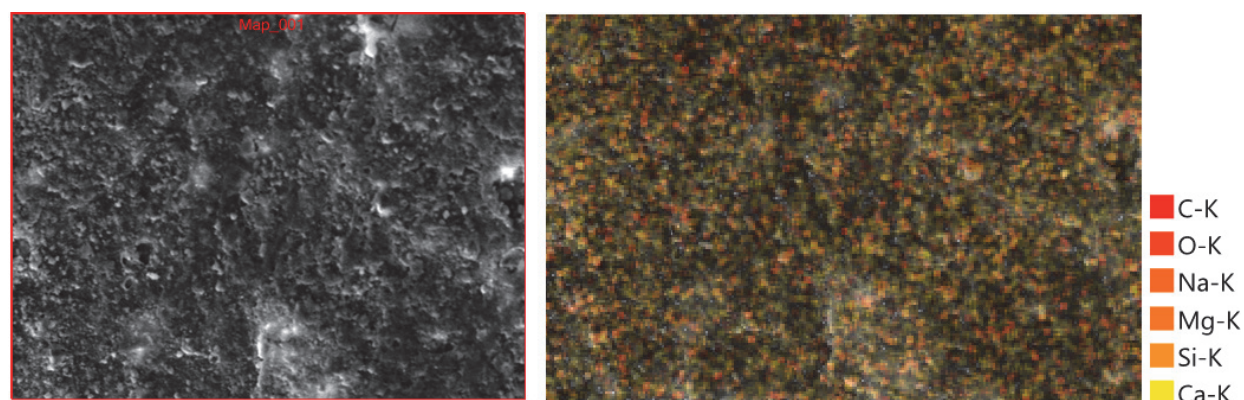


Рис. 6. СЭМ-изображения поперечных срезов образца бумаги из карбоната кальция

На СЭМ-изображениях (рис. 2–5) явно видны тесное переплетение расщепленных волокон и присутствие таких элементов, как углерод, кислород, алюминий и кальций, что характеризует наличие наполнителя и проклеивающих веществ. На рис. 6 изображен поперечный срез бумаги из карбоната кальция и полиэтилена, поэтому структура плотная без волокон.

На рис. 7–10 представлены микроснимки картирования элементов исследуемых бумаг.

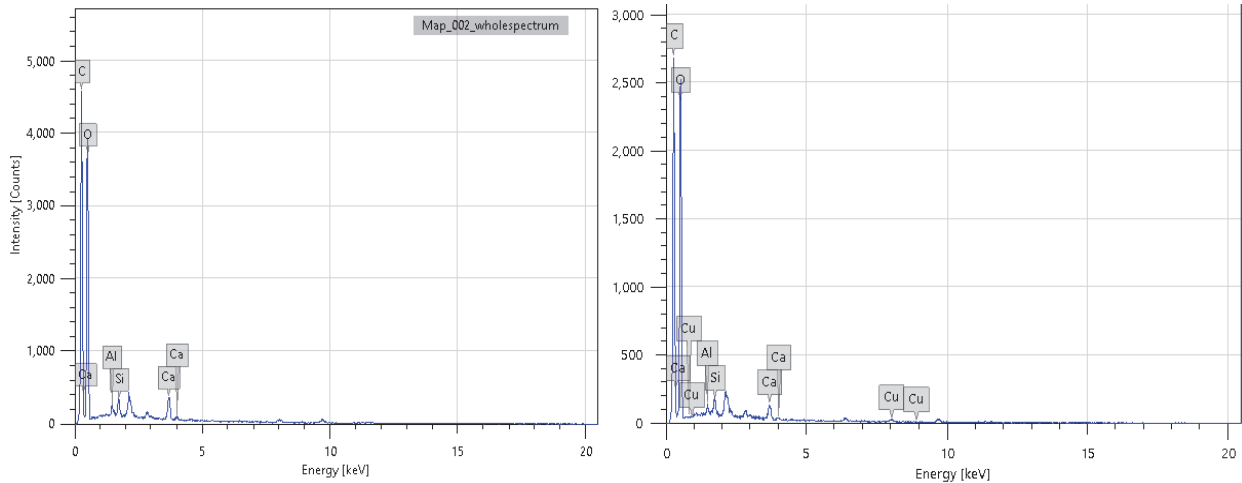


Рис. 7. Микроснимок картирования элементов бумаги № 1

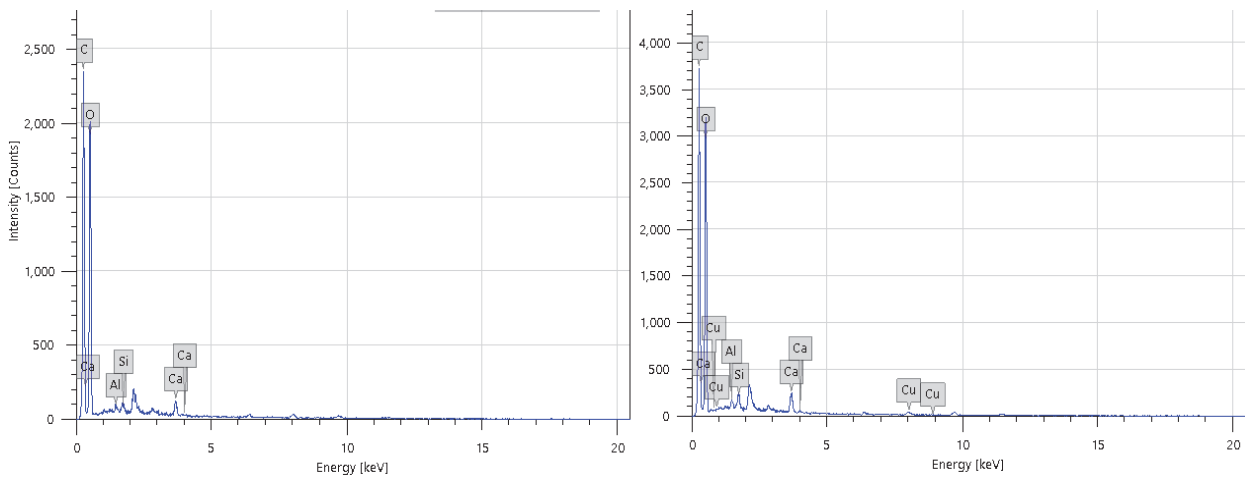


Рис. 8. Микроснимок картирования элементов бумаги № 2

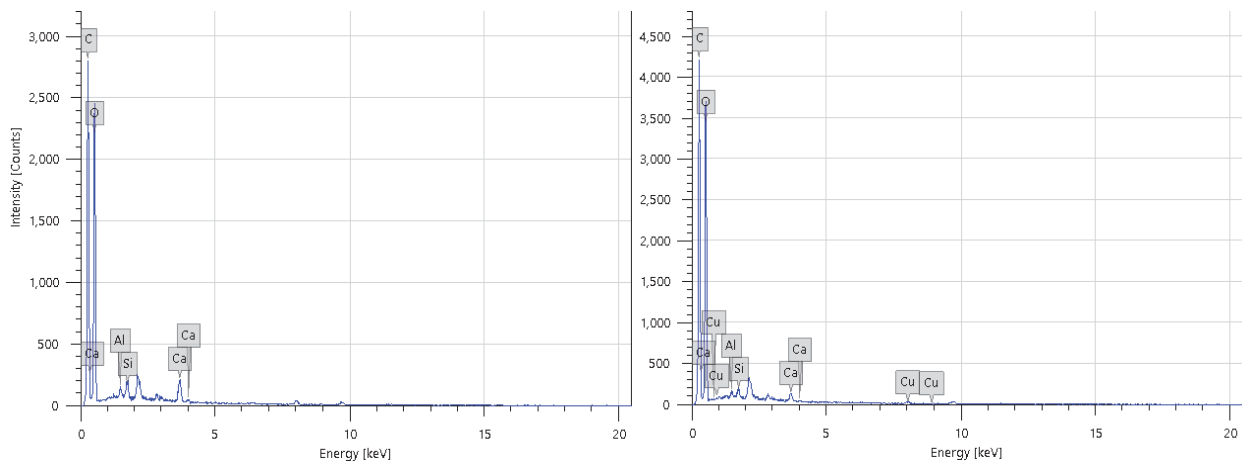


Рис. 9. Микроснимок картирования элементов бумаги № 3

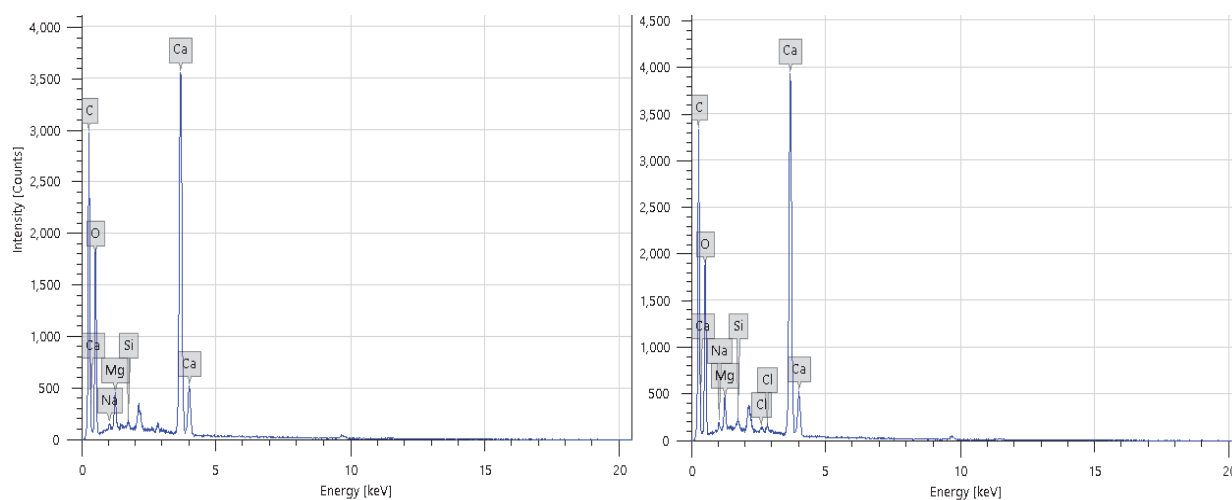


Рис. 10. Микроснимок картирования элементов бумаги № 4

Как известно, химический состав бумаги в процентном соотношении выглядит следующим образом: 49,5% – углерод, 44,2% – кислород и 6,3% – водород. Сравнение элементного состава бумаг показало (рис. 7–10), что в исследуемых образцах выявлены высокий уровень интенсивности сигнала рентгеновского излучения таких элементов, как углерод, кислород, меньший уровень интенсивности кальция, алюминия, кремния, меди, что подтверждает содержание других веществ, добавленных для улучшения свойств бумаги. Содержание элемента кремния говорит о том, что в качестве наполнителя использован диоксид кремния (кремнезем), а это улучшает поверхностные и сорбционные свойства бумаги за счет формирования защитного покрытия. Высокая адсорбционная способность и развитая пористая структура наполнителя улучшают белизну, обеспечивают равномерное распределение элементов печатной краски и яркость цветовой гаммы. У образца бумаги и 4 наблюдается высокий уровень интенсивности кальция, потом углерода и кислорода, что подтверждает наличие карбоната кальция. Данный образец полностью из карбоната кальция с добавлением полиэтилена, поэтому на микроснимках картирования отсутствуют элементы меди, имеющиеся в природной воде и волокнах растений.

Как известно, абсолютная масса атома очень мала, например масса атома водорода около $1,67 \cdot 10^{-24}$ г. Поэтому в химии и физике для практических целей предложена относительная (условная) величина, называемая атомной массой. Эта величина показывает, во сколько раз масса атома данного элемента больше массы атома эталонной единицы – атома углерода. По данным атомной массы можно определить, во сколько раз элементы тяжелее $1/12$ атома водорода.

Рентгеновский микроанализ позволил получить одно из фундаментальных свойств атома – линейную и атомную массы элементов, имеющихся на поверхности анализируемого участка бумаги (табл. 2–5).

Таблица 2. Содержание химических элементов на образце бумаги № 1 (100%-ная макулатура)

Элементы	Линейная масса, %			Атомная масса, %		
	1	2	3	1	2	3
C–K	46,73 ± 0,15	45,76 ± 0,19	46,68 ± 0,14	54,59 ± 0,17	54,96 ± 0,04	54,57 ± 0,17
O–K	50,47 ± 0,32	51,35 ± 0,41	50,51 ± 0,31	44,26 ± 0,28	37,80 ± 0,05	44,32 ± 0,27
Al–K	0,45 ± 0,03	0,39 ± 0,03	0,47 ± 0,02	0,23 ± 0,01	1,67 ± 0,01	0,24 ± 0,01
Si–K	0,64 ± 0,03	0,53 ± 0,03	0,57 ± 0,03	0,32 ± 0,01	2,22 ± 0,01	0,29 ± 0,01
Ca–K	1,70 ± 0,04	0,97 ± 0,04	1,46 ± 0,04	0,60 ± 0,02	3,05 ± 0,01	0,51 ± 0,01
Cu–K	–	1,00 ± 0,08	0,30 ± 0,04	–	0,22 ± 0,02	0,07 ± 0,01
Сумма						100,0

Таблица 3. Содержание химических элементов на образце бумаги № 2 (30%-ная макулатура, 117 г/м²)

Элементы	Линейная масса, %			Атомная масса, %		
	1	2	3	1	2	3
C–K	46,46 ± 0,21	46,49 ± 0,16	47,11 ± 0,15	54,03 ± 0,24	54,61 ± 0,19	54,82 ± 0,17
O–K	51,88 ± 0,46	50,09 ± 0,35	50,65 ± 0,32	45,30 ± 0,40	44,17 ± 0,31	44,25 ± 0,28
Al–K	0,30 ± 0,03	0,42 ± 0,03	0,42 ± 0,02	0,16 ± 0,02	0,22 ± 0,01	0,22 ± 0,01
Si–K	0,22 ± 0,03	0,55 ± 0,03	0,49 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,27 ± 0,01	0,25 ± 0,01
Ca–K	1,14 ± 0,05	1,38 ± 0,04	1,33 ± 0,04	0,40 ± 0,02	0,49 ± 0,02	0,46 ± 0,01
Cu–K	–	1,08 ± 0,07	–	–	0,24 ± 0,02	–
Сумма						100,0

Таблица 4. Содержание химических элементов на образце бумаги № 3 (30%-ная макулатура, 132 г/м²)

Элементы	Линейная масса, %			Атомная масса, %		
	1	2	3	1	2	3
C–K	46,80 ± 0,19	47,01 ± 0,16	46,24 ± 0,17	54,63 ± 0,22	54,68 ± 0,18	54,43 ± 0,20
O–K	50,51 ± 0,41	51,16 ± 0,34	50,04 ± 0,36	44,27 ± 0,36	44,67 ± 0,29	44,22 ± 0,32
Al–K	0,42 ± 0,03	0,29 ± 0,02	0,56 ± 0,03	0,22 ± 0,02	0,15 ± 0,01	0,29 ± 0,02
Si–K	0,57 ± 0,04	0,30 ± 0,02	0,57 ± 0,03	0,28 ± 0,02	0,15 ± 0,01	0,29 ± 0,02
Ca–K	1,70 ± 0,06	0,63 ± 0,03	1,50 ± 0,05	0,59 ± 0,02	0,22 ± 0,01	0,53 ± 0,02
Cu–K	–	0,61 ± 0,05	1,09 ± 0,07	–	0,13 ± 0,01	0,24 ± 0,02
Сумма						100,0

Таблица 5. Содержание химических элементов на образце бумаги № 4 (из карбоната кальция)

Элементы	Линейная масса, %			Атомная масса, %		
	1	2	3	1	2	3
C–K	35,47 ± 0,14	37,09 ± 0,14	34,79 ± 0,15	48,44 ± 0,19	50,27 ± 0,19	48,75 ± 0,21
O–K	39,92 ± 0,37	38,54 ± 0,35	37,15 ± 0,39	40,93 ± 0,38	39,22 ± 0,36	39,08 ± 0,41
Na–K	0,42 ± 0,04	0,58 ± 0,04	0,32 ± 0,04	0,30 ± 0,03	0,41 ± 0,03	0,24 ± 0,03
Mg–K	1,54 ± 0,05	1,47 ± 0,04	1,50 ± 0,05	1,04 ± 0,03	0,98 ± 0,03	1,04 ± 0,03
Si–K	0,18 ± 0,02	0,21 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,10 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,07 ± 0,01
Cl–K	–	0,27 ± 0,02	–	–	0,12 ± 0,01	–
Ca–K	22,47 ± 0,15	21,83 ± 0,14	25,17 ± 0,17	9,20 ± 0,06	8,86 ± 0,06	10,57 ± 0,07
Cu–K	–	–	0,94 ± 0,07	–	–	0,25 ± 0,02
Сумма						100,0

По данным табл. 2–4 видно, что среднее значение атомной массы элемента кислорода в целлюлозных бумагах составляет 44,48%, а углерода – 54,59%. В составе бумаги без целлюлозы (табл. 5) наблюдается повышенное содержание кальция (в среднем 9,54), тогда как у целлюлозных бумаг – 0,48, что в 20 раз больше – это объясняет присутствие карбоната кальция.

Закключение. Сравнение СЭМ-изображений показало, что на целлюлозных бумагах явно видны тесное переплетение расщепленных волокон и наличие таких элементов, как углерод, кислород, алюминий и кальций. Бумаги из карбоната кальция и полиэтилена имеют плотную структуру без волокон. Сравнительный анализ элементного состава исследуемых видов бумаги продемонстрировал высокий уровень интенсивности рентгеновского излучения углерода и кислорода. Уровень интенсивности для кальция, алюминия, кремния и меди ниже, что подтверждает наличие других добавок, используемых для улучшения свойств бумаги. Присутствие кремния указывает на применение в качестве наполнителя диоксида кремния (кремнезема), который способствует улучшению поверхностных и сорбционных характеристик бумаги благодаря образованию защитного слоя. Данный слой помогает повысить прочность бумаги, улучшить ее текстуру и уменьшить проницаемость, что, в свою очередь, положительно сказывается на качестве печати и долговечности конечного

продукта. В образце бумаги на основе карбоната кальция отмечен высокий уровень кальция, а также углерода и кислорода. В этом образце присутствует полиэтилен, который, будучи инертным материалом, не взаимодействует с элементами, содержащимися в окружающей среде, что подтверждает его чистоту и отсутствие примесей. Таким образом, результаты микроскопического анализа подтверждают специфику состава образца и его изоляцию от внешних загрязняющих веществ. Полученные данные подтверждают эффективность методов СЭМ и ЭДС-анализа для быстрого анализа химического состава и структуры бумаги, позволяя точно и оперативно идентифицировать составы бумаги из различных сырьевых материалов. Это, в свою очередь, может помочь предсказать их поверхностные и сорбционные свойства, а также влияние на качество печати.

Описанные методы предоставляют возможность точно и оперативно идентифицировать составы бумаги, изготовленной из различных сырьевых материалов, что существенно помогает в прогнозировании поверхностных и сорбционных свойств бумаги. Использование СЭМ и ЭДС-анализа значительно оптимизирует производственные процессы и выбор материалов, что в итоге может привести к росту конкурентоспособности продукции на рынке.

Список литературы

1. Зеер Г. М., Фоменко О. Ю., Ледяева О. Н. Применение сканирующей электронной микроскопии в решении актуальных проблем материаловедения // *Journal of Siberian Federal University. Seria Chemistry*. 2009. № 2. С. 287–293.
2. Методика анализа картирования элементного состава ткани миокарда с применением сканирующего трансмиссионного микроскопа / А. А. Комисов [и др.] // *Научный результат. Сер. Медицина и фармация*. 2015. Т. 1, № 4 (6). С. 36–39. doi: 10.18413/2313-8955-2015-1-4-36-39.
3. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
4. Криштал М. М., Ясников И. С., Полунин В. И. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.
5. Bierman B. J. Automated SEM/EDS Analysis and Classification of Forensic Samples // Created 2010-10-17 Published on Forensic Magazine 23:33. URL: <http://www.forensicmag.com> (date of access: 15.12.2025).
6. Быков Ю. А., Карпушин С. Д., Бойченко М. К. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ. Аппаратура, принцип работы, применение. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2003. Режим доступа: <http://lab.bmstu.ru/rem/index/htm> (дата обращения: 15.12.2025).
7. Pachauri T., Singla V., Satsongi A. SEM-EDX Characterization of Individual Coarse Particles in Agra // *India Aerosol and Air Quality Research*. 2013. No. 13. P. 523–536.
8. Vertical Profiles of Airborne PM in Po Valley During Wheat Harvest Activities / C. Telloli [et al.] // *Advances in Natural Science*. 2013. Vol. 6, no. 4. P. 27–34.
9. SEM-EDS analysis and discrimination of forensic soil / S. Cengiz [et al.] // *Forensic Science International*. 2004. Vol. 141, issue 1. P. 33–37.
10. Область гомогенности фазы β – системы Al – Mn – Si при 823 К / Н. В. Казеннов [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 3. С. 30–36.
11. Automated SEM-EDS (QEMSCAN®) Mineral Analysis in Forensic Soil Investigations: Testing Instrumental Reproducibility Chapter 26 / D. Pirrie [et al.] // *Criminal and Environmental Soil Forensics* / ed. by K. Ritz [et al.]. London: © Springer Science + Business Media, 2009. P. 411–430.
12. Фазовые равновесия в системе Al – Mn – Si при 823 К / Н. В. Казеннов [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 3. С. 23–29.

13. Бражников А. Ю., Варепо Л. Г., Нагорнова И. В. Визуализация распределения печатных красок в поверхностном слое бумаги с применением СЭМ и ЭДС-анализа // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 7. Ч. 1. С. 257–263.
14. Структурно-механические свойства бесцеллюлозной бумаги / Х. А. Бабаханова [и др.] // Проблемы полиграфии и издательского дела. 2021. № 2. С. 4–7.
15. Поверхностные и оптические свойства бумаги из карбоната кальция / Х. А. Бабаханова [и др.] // Известия НАН. Сер. химических наук. 2021. № 4. С. 472–479.

References

1. Zeer G. M., Fomenko O. Yu., Ledyayeva O. N. Application of scanning electron microscopy in solving current problems of materials science. *Journal of Siberian Federal University, seria Chemistry*, 2009, no. 2, pp. 287–293 (In Russian).
2. Komisov A. A., Osipova O. A., Shepel R. N., Kletkina A. S. Methodology for analyzing the mapping of the elemental composition of myocardial tissue using a scanning transmission microscope. *Nauchnyy rezul'tat* [Scientific result], series Medicine and Pharmacy, 2015, vol. 1, no. 4 (6), pp. 36–39. doi: 10.18413/2313-8955-2015-1-4-36-39 (In Russian).
3. Brandon D., Kaplan W. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. [Microstructure of Materials. Methods of research and control]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 384 p. (In Russian).
4. Krishtal M. M., Yasnikov I. S., Polunin V. I. *Skanirovannaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyy mikroanaliz v primerakh prakticheskogo primeneniya* [Scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis in examples of practical application]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009. 208 p. (In Russian).
5. Bierman B. J. Automated SEM/EDS Analysis and Classification of Forensic Samples. *Created 2010-10-17 Published on Forensic Magazine 23:33*. Available at: <http://www.forensicmag.com> (accessed 15.12.2025).
6. Bykov Yu. A., Karpushin S. D., Boychenko M. K. *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyy analiz. Apparatura, printsip raboty, primeneniye* [Scanning electron microscopy and X-ray spectral analysis. Equipment, operating principle, application]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet imeni N. E. Baumana Publ., 2003. Available at: <http://lab.bmstu.ru/rem/index/htm> (accessed 15.12.2025) (In Russian).
7. Pachauri T., Singla V., Satsangi A. SEM-EDX Characterization of Individual Coarse Particles in Agra. *India Aerosol and Air Quality Research*, 2013, no. 13, pp. 523–536.
8. Telloli C., Coren F., Masrocchino E., Vaccaro C. Vertical Profiles of Airborne PM in Po Valley During Wheat Harvest Activities. *Advances in Natural Science*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 27–34.
9. Cengiz S., Karaca A., Cakir I., Uner H., Sevindik A. SEM-EDS analysis and discrimination of forensic soil. *Forensic Science International*, 2004, vol. 141, issue 1, pp. 33–37.
10. Kazennov N. V., Kalmykov K. B., Dunaev S. F., Dmitrieva N. E. Homogeneity region of the β - phase of the Al-Mn-Si system at 823 K. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2011, no. 3, pp. 30–36 (In Russian).
11. Pirrie D., Power M., Rollinson G., Wiltshire P., Campbell Y. Automated SEM-EDS (QEMSCAN®) Mineral Analysis in Forensic Soil Investigations: Testing Instrumental Reproducibility Chapter 26. *Criminal and Environmental Soil Forensics*, 2009, pp. 411–430.
12. Kazennov N. V., Kalmykov K. B., Dunaev S. F., Dmitrieva N. E. Phase equilibria in the Al-Mn-Si system at 823 K. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2011, no. 3, pp. 23–29 (In Russian).
13. Brazhnikov A. Yu., Vарепо L. G., Nagornova I. V. Visualization of the distribution of printing inks in the surface layer of paper using SEM and EDS analysis. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* [Tula State University News. Technical Sciences], 2016, issue 7, part 1, pp. 257–263 (In Russian).
14. Babakhanova Kh. A., Ismailov I. I., Sadridinov A. A., Saidova D. Sh. Structural and mechanical properties of cellulose-free paper. *Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela* [Problems of printing and publishing], 2021, no. 2, pp. 4–7 (In Russian).

15. Babakhanova Kh. A., Ismailov I. I., Sadriddinov A. A., Babakhanova M. A., Saidova D. Sh. Surface and optical properties of calcium carbonate paper. *Izvestiya NAN [NAS News]*, series Chemical Sciences, 2021, no. 4, pp. 472–479 (In Russian).

Информация об авторах

Бабаханова Халима Абишевна – доктор технических наук, профессор кафедры химической и полиграфической инженерии. Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности (ул. Шохжахон, 5, 100100, г. Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: halima300@inbox.ru. SPIN-код: 1132-6663. Scopus ID: 57201773008. ORCID: 0000-0002-6956-2824. ResearcherID: LZI-0942-2025.

Дилшод Чоршанби Равшанзода – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии, машин и оборудования полиграфического производства. Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими (пр. Академиков Раджабовых, 10, 734042, г. Душанбе, Республика Таджикистан). E-mail: 234-56-57@mail.ru. SPIN-код: 9018-9719. Scopus ID: 57219165467. ORCID: 0000-0002-5628-4706.

Садриддинова Нигора Жунадилло кизи – докторант кафедры химической и полиграфической инженерии. Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности (ул. Шохжахон, 5, 100100, г. Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: nigorakukanova@mail.com. ORCID: 0009-0004-2075-6312.

Бабаханова Мадина Авазовна – доктор химических наук. Ташкентский государственный технический университет ГУ «Фан ва тараккиет» (ул. Мирзо Голиб, 7а, 100174, г. Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: madina89@mail.ru. Scopus ID: 57767806900.

Громыко Ирина Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полиграфических производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gromyko@belstu.by. SPIN-код: 3869-1433. ORCID: 0000-0002-0896-7262. ResearcherID: rid143948.

Information about the authors

Babakhanova Khalima Abishevna – DSc (Engineering), Professor, the Department of Chemical and Printing Engineering. Tashkent Institute of Textile and Light Industry (5 Shokh-zakhon str., 100100, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: halima300@inbox.ru. SPIN code: 1132-6663. Scopus ID: 57201773008. ORCID: 0000-0002-6956-2824. ResearcherID: LZI-0942-2025.

Dilshod Chorshanbi Ravshanzoda – PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Technology, Machines and Equipment. Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi (10 Ave. Academician Radjabov, 734042, Dushanbe, Republic of Tajikistan). E-mail: 234-56-57@mail.ru. SPIN code: 9018-9719. Scopus ID: 57219165467. ORCID: 0000-0002-5628-4706.

Sadriddinova Nigora Zhunadillo kizi – Post-doktoral student, the Department of Technology of Chemical and Printing Engineering. Tashkent Institute of Textile and Light Industry (5 Shokhzhakhon str., 100100, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: nigorakukanova@mail.com. ORCID: 0009-0004-2075-6312.

Babakhanova Madina Avazovna – PhD (Chemistry). Tashkent State Technical University State Unitary Enterprise “Fan va tarakkiet” (7a Mirzo Golib str., 100174, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: madina89@mail.ru. Scopus ID: 57767806900.

Gromyko Irina Grigor'yevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Printing Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gromyko@belstu.by. SPIN code: 3869-1433. ORCID: 0000-0002-0896-7262. ResearcherID: rid143948.

Поступила 06.01.2026