

ХІМІЯ

УДК 543.422.7:547.97

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-3-1>

Олена ЄВДОЧЕНКО

доктор філософії у галузі освіти та педагогіки, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0001-6338-5372

Scopus Author ID: 59242263100

Олександр КАМІНСЬКИЙ

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0003-1971-8437

Scopus Author ID: 55644133300

Сніжана КУЧЕРУК

доктор філософії у галузі хімії та біоінженерії, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0002-5978-487X

Scopus Author ID: 57365874700

Роман ДЕНИСЮК

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0003-3077-3795

Scopus Author ID: 57200563715

Микола ЧАЙКА

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0001-5356-9856

Scopus Author ID: 57200568202

Юлія ЧАЙКА

кандидат біологічних наук, старший викладач кафедри медико-біологічних дисциплін, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0002-3965-6088

Scopus Author ID: 57221502558

Ольга АВДЕЄВА

доктор філософії у галузі знань освітніх, педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0001-6550-0776

Scopus Author ID: 59242263300

Бібліографічний опис статті: Євдоченко, О., Камінський, О., Кучерук, С., Денисюк, Р., Чайка, М., Чайка, Ю., Авдєєва, О. (2025). Фотодеструкція харчових барвників з водних розчинів під дією УФ-випромінювання. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-3-1>

ФОТОДЕСТРУКЦІЯ ХАРЧОВИХ БАРВНИКІВ З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ПІД ДІЄЮ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Відповідно до Директиви ЄС «Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption» одним із важливих харчових продуктів визнано питну воду, для якої прийняті стандарти вмісту різноманітних забруднювачів, серед яких барвники. Також слід відмітити, що однією з ключових цілей на 2030 рік країн ЄС є гарантування доступності та довгострокового забезпечення водопостачання та санітарії для всіх (шоста ціль сталого розвитку (ЦСР)).

Сучасна промисловість випускає понад 10^7 тон різноманітних синтетичних барвників, 15–20% яких потрапляють у стічні води. Тому проблема очистки водойм від барвників залишається актуальною.

У роботі проведено порівняльний аналіз фотодеструкції харчових барвників, що входять до складу льодяників червоного, зеленого та жовтого кольорів торгових марок «Mintex+», «Вім Вот», «Дюшес», «Citrus Міх» та «Juice Міх».

Показано, що ступінь стійкості червоних барвників до ультрафіолетового випромінювання варіюється залежно від зразка. Найвищу стійкість продемонстрував барвник, застосований у льодяниках «Citrus Міх», тоді як найнижчу – у зразку «Juice Міх». Визначено, що червоні барвники загалом характеризуються відносно високою стійкістю до фотодеструкції.

Подібна тенденція спостерігається і для зелених барвників, хоча їх стійкість до УФ-випромінювання виявилася меншою. Найбільш стабільним виявився барвник, що використовується в продукті «Дюшес», а найменш стійким – у льодяниках «Вім Вот». Визначено, що зелені барвники є більш вразливими до процесів фотодеструкції у порівнянні з червоними.

Визначено варіативність стійкості жовтих барвників до УФ-випромінювання. Встановлено, що найвищу стійкість продемонстрував барвник із льодяників «Вім Вот», найменшу – зразок «Juice Міх». Відповідно до отриманих результатів, за ступенем стійкості до фотодеструкції барвники можна розмістити в такій послідовності: червоні < жовті < зелені. Одержані результати можна пояснити хімічною природою синтетичних барвників та їх здатності до процесів фотодеструкції.

Ключові слова: харчові барвники, фотодеструкція, ступінь фотодеструкції, фотокolorиметрія, харчова хімія.

Olena YEVDCHENKO

Doctor of Philosophy in Education and Pedagogy, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0001-6338-5372

Scopus Author ID: 59242263100

Oleksandr KAMINSKYI

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0003-1971-8437

Scopus Author ID: 55644133300

Snizhana KUCHERUK

Doctor of Philosophy in Chemistry and Bioengineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0002-5978-487X

Scopus Author ID: 57365874700

Roman DENYSIUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0003-3077-3795

Scopus Author ID: 57200563715

Mykola CHAIKA

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0001-5356-9856

Scopus Author ID: 57200568202

Yuliia CHAIKA

Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer at the Department of Medical and Biological Disciplines, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0002-3965-6088

Scopus Author ID: 57221502558

Olha AVDIEIEVA

Doctor of Philosophy in Education and Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0001-6550-0776

Scopus Author ID: 59242263300

To cite this article: Yevdochenko, O., Kaminskyi, O., Kucheruk, S., Denysiuk, R., Chaika, M., Chaika, Yu., Avdieieva, O. (2025). Fotodestruktsiya kharchovykh barvnykiv z vodnykh rozchyniv pid diyeyu UF-vyprominyuvannya [Photodestruction of food dyes from aqueous solutions under the influence of UV radiation]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-3-1>

PHOTODESTRUCTION OF FOOD DYES FROM AQUEOUS SOLUTIONS UNDER THE INFLUENCE OF UV RADIATION

In accordance with the EU Directive "Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption", drinking water is recognized as one of the important food products, for which standards for the content of various pollutants, including dyes, have been adopted. It should also be noted that one of the key goals for 2030 of the EU countries is to guarantee accessibility and long-term provision of water supply and sanitation for all (the sixth Sustainable Development Goal (SDG)).

Modern industry produces more than 107 tons of various synthetic dyes, 15–20% of which end up in wastewater. Therefore, the problem of cleaning water bodies from dyes remains relevant.

The paper presents a comparative analysis of the photodegradation of food dyes included in the red, green and yellow candies of the brands «Mintex+», «Bim Bom», «Duchess», «Citrus Mix» and «Juice Mix».

It is shown that the degree of resistance of red dyes to ultraviolet radiation varies depending on the sample. The highest resistance was demonstrated by the dye used in «Citrus Mix» candies, while the lowest was demonstrated in the «Juice Mix» sample. It was determined that red dyes are generally characterized by relatively high resistance to photodegradation.

A similar trend is observed for green dyes, although their resistance to UV radiation was lower. The dye used in the product «Duchess» was the most stable, and the least stable was in the «Bim Bom» candies. It was determined that green dyes are more vulnerable to photodegradation processes compared to red ones.

The variability of the resistance of yellow dyes to UV radiation was determined. It was found that the dye from the «Bim Bom» lollipops demonstrated the highest resistance, the «Juice Mix» sample the lowest. According to the results obtained, the dyes can be placed in the following sequence in terms of the degree of resistance to photodegradation: red < yellow < green. The results obtained can be explained by the chemical nature of synthetic dyes and their ability to photodegradation processes.

Key words: food dyes, photodegradation, degree of photodegradation, photocolorimetry, food chemistry.

Вступ. Наявність кольору є однією з основних характеристик, яка впливає на підвищення споживчої привабливості харчових продуктів, зокрема таких як: солодоші, цукерки, карамель та газовані напої. У сучасному харчовому

виробництві спостерігається зростаюча тенденція до використання синтетичних барвників, які сприяють покращенню зовнішнього вигляду продукції, забезпечують яскравість, стабільність і контрастність кольорів. Крім того, штучні

барвники мають значно нижчу собівартість порівняно з натуральними аналогами.

Різні категорії харчових продуктів зокрема: цукерки, льодяники, желе, мармелад, драже, зефір, морозиво тощо, а також солодкі безалкогольні напої можуть містити як заборонені в країнах Європейського Союзу синтетичні барвники, так і надмірну кількість дозволених речовин. Варто зауважити, що в окремих зразках кондитерської продукції виявлено наявність барвників, у тому числі, текстильного походження [1–3], які становлять потенційну загрозу для здоров'я людини, викликаючи такі негативні наслідки як: мутагенні ефекти, онкологічні захворювання, зниження рівня гемоглобіну, алергічні реакції тощо [4–5].

Також слід відмітити, що харчові барвники, які потрапляють у навколишнє середовище у процесі викидів їх надлишку підприємствами або не правильної утилізації харчових продуктів, у яких закінчився строк придатності, призводить до забруднення у першу чергу водойм. Тому пошук ефективних методів очистки водойм від барвників залишається актуальною проблемою сьогодення.

Аналіз літератури. Авторами у роботі [6] розроблено декілька способів колориметричного аналізу лаккази на основі харчових барвників, які можна використовувати для порівняння відносної активності лаккази між різними штамми *S. neoformans*. Виявлено, що фенольна деградація кольору залежить від кількості глюкози, що може відображати зміни у відновних властивостях середовища. Колориметричний аналіз на основі харчових барвників має кілька переваг, включаючи нижчу вартість, незворотність та відсутність потреби в постійному моніторингу, порівняно з поширеним аналізом 2,2'-азино-біс(3-етилбензотіазолін-6-сульфоною кислотою (ABTS), який використовується для визначення активності лаккази. Показано, що розроблені методики можуть використовуватися для біоремедіації забруднювачів води, окрім його використання для визначення експресії фактора вірулентності лаккази.

У дослідженні [7] авторами виконано порівняльний аналіз фотостабільності трьох органічних червоних барвників у водних розчинах та розчинах безалкогольних напоїв: Red 40 (алура червоний АС), бетаніну та кармінової кислоти. Показано, що фотодеградація, досліджена за

допомогою абсорбційної спектроскопії, добре відповідає кінетиці першого порядку. У водному розчині спостерігаються дві різні часові шкали, одна з яких є швидша дестабілізація в матриці безалкогольного напою. Визначено, що бетанін є найменш стабільним барвником в обох середовищах розчинників, а Red 40 демонструє найбільшу дестабілізацію в розчині безалкогольного напою.

У роботі [8] досліджено вплив різних значень рН та термічної обробки на стабільність препаратів барвників з квітів блакитного гороху та порівняно з препаратами зі спіруліни. Загальний вміст антоціанів, загальний вміст фенолів, антиоксидантну активність та загальну зміну кольору (ΔE) визначали з інтервалами в 6 днів за різного значення рН (рН 3, 4, 5 та 6 протягом 30 днів при 4 та 26 °C) та після термічної обробки (60, 80 та 100 °C протягом 10 та 30 хвилин). Виявлено високу стабільність препаратів барвників з квітів блакитного гороху під час їх зберігання при рН 3 та 4 за 4 °C протягом 30 днів та вищу термічну стабільність, ніж спіруліни, за таких самих умов термічної обробки. Показано, що при зберіганні в холодильнику антиоксидантна активність препаратів барвників з квітів блакитного гороху за всіх умов рН була вищою, ніж у спіруліни.

У оглядовій роботі [9] проведено порівняльний аналіз ефективності фотокаталізу як методу очистки промислових стічних вод від текстильних барвників. Підкреслено необхідність вирішення кількох проблем фотокаталізу, таких як: часу контакту, рН, УФ-випромінювання, механізмів фотодеструкції, дослідження стічних вод змішаних барвників, вивчення впливу побічних продуктів, що утворюються у процесі фотокаталізу, на навколишнє середовище тощо.

Проте, дослідження процесів фотодеструкції харчових барвників у водних розчинах вивчено недостатньо.

Метою даної роботи є: порівняльний аналіз процесів фотодеструкції барвників, що входять до складу льодяників червоного, зеленого та жовтого кольорів торгових марок «Mintex+», «Bim Bom», «Дюшес», «Citrus Mix» та «Juice Mix».

Експериментальна частина. У якості об'єктів дослідження використано зразки льодяників червоного, зеленого та жовтого кольорів торгових марок «Mintex+», «Bim Bom», «Дюшес», «Citrus Mix» та «Juice Mix».

Зразок льодяника певного кольору масою 5 г подрібнювали на шматочки, переносили у колбу та додавали 50 мл дистильованої води. Шляхом періодичного перемішування розчиняли зразки протягом 1-2 годин. Оптичну густину барвників у розчині до та після фотодеструкції визначали за допомогою фотоколориметра КФК-2 з товщиною кварцової кювети 2 см. У якості розчину для порівняння використовували дистильовану воду.

З метою перевірки стійкості барвників різних кольорів до дії УФ-випромінювання використано установку, зображену на рис. 1.

Відміряли 25 мл розчину відповідного барвника та опромінювали за допомогою УФ-лампи потужністю 40 Вт ($\lambda = 365\text{--}400$ нм) протягом 10 хвилин без перемішування. Оптичну густину розчинів барвників до та після фотодеструкції визначали фотометрично.

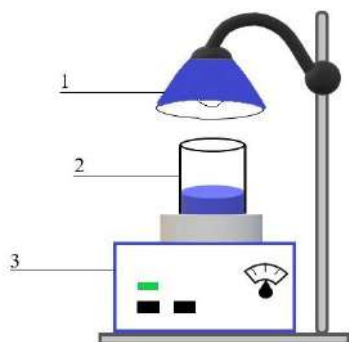


Рис. 1. Установка для проведення фотодеструкції барвників [10]

Установка для проведення фотодеструкції складається з таких основних частин: 1. УФ-лампа; 2. склянка з розчином барвника; 3. електромішалка.

Ступінь фотодеструкції барвників розраховували за формулою:

$$X, \% = \frac{(D_0 - D_1)}{D_0} \cdot 100\%,$$

де $X, \%$ – ступінь фотодеструкції, D_0 та D_1 – оптична густина до та після фотодеструкції барвника відповідно.

Результати та їх обговорення. На рис. 2 показано діаграму залежності ступеня фотодеструкції червоного барвника від марки виробника льодяників (довжина хвилі 490 нм).

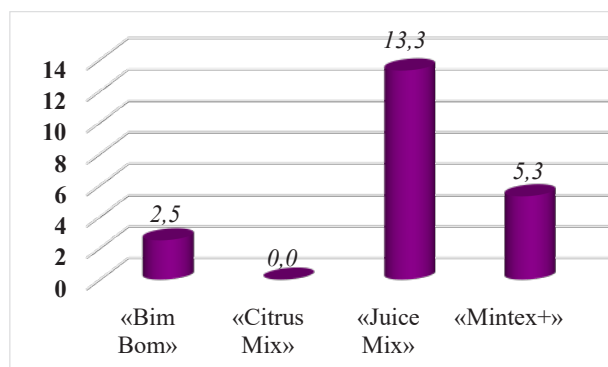


Рис. 2. Діаграма залежності ступеня фотодеструкції червоного барвника від марки виробника льодяників

Визначено, що стійкість червоних барвників до УФ-випромінювання різна. Найбільш стійким є барвник у льодяниках марки «Citrus Mix», а найменш стійким – «Juice Mix». Слід зазначити, що червоні барвники досить важко піддаються процесам фотодеструкції, що видно із величин ступеня фотодеструкції.

На рис. 3. показано діаграму залежності ступеня фотодеструкції зеленого барвника від марки виробника льодяників (довжина хвилі 400 нм).

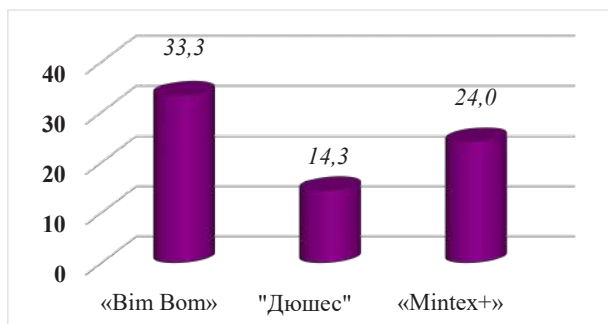


Рис. 3. Діаграма залежності ступеня фотодеструкції зеленого барвника від марки виробника льодяників

Показано, що стійкість зелених барвників до УФ-випромінювання також різна. Найбільш стійким є барвник, що міститься у льодяниках марки «Дюшес», а найменш стійким – «Bim Bom». Визначено, що у порівнянні з червоними барвниками зелені барвники більш схильні до фотодеструкції, що можна помітити із величин

ступеня фотодеструкції. Таку залежність можна пояснити тим, що зелені барвники утворені змішуванням інших кольорів, які більш чутливі до УФ-випромінювання.

Помічено, що у процесі фотодеструкції розчини жовтого барвника, які утворені із льодяників марок «Vim Bom» та «Juice Mix» святяться блакитнуватим світлом під дією УФ-випромінювання, розчини барвника з льодяників «Citrus Mix» має блакитно-салатове свічення, а барвник з льодяників «Mintex+» світиться жовто-салатовим свіченням.

На рис. 4 показано діаграму залежності ступеня фотодеструкції жовтого барвника від марки виробника льодяників (довжина хвилі 364 nm).

Визначено, що стійкість жовтих барвників до УФ-випромінювання також різна. Найбільш стійким є барвник з льодяників марки «Vim Bom», а найменш стійким – «Juice Mix».

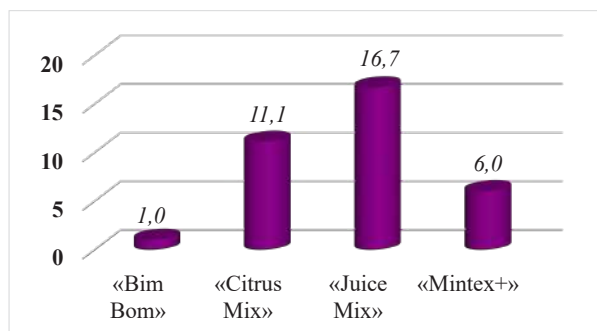


Рис. 4. Діаграма залежності ступеня фотодеструкції жовтого барвника від марки виробника льодяників

За величиною ступеня фотодеструкції барвники можна розташувати у таку залежність: **червоний < жовтий < зелений**.

Висновки. У роботі проведено порівняльний аналіз процесів фотодеструкції водних розчинів харчових барвників червоного, зеленого та жовтого кольорів, виготовлених з льодяників різних марок. Виявлено, що стійкість червоних барвників до УФ-випромінювання різна. Найбільш стійким є барвник, який використовується в льодяниках марки «Citrus Mix», а найменш стійким – «Juice Mix». Слід зазначити, що червоні барвники досить важко піддаються процесам фотодеструкції, що видно із величин ступеня фотодеструкції.

Визначено, що стійкість зелених барвників до УФ-випромінювання також різна. Найбільш стійким є барвник, який міститься у льодяниках марки «Дюшес», а найменш стійким – «Vim Bom». Встановлено, що у порівнянні з червоними барвниками зелені барвники більш схильні до фотодеструкції.

Показано, що стійкість жовтих барвників до УФ-випромінювання також відрізняється залежно від марки льодяників. Найбільш стійким є барвник, який використовується в льодяниках «Vim Bom», а найменш стійким – «Juice Mix». Визначено, що стійкість барвників до фотодеструкції зменшується у такій послідовності: **червоний < жовтий < зелений**.

У роботі показано перспективність використання УФ-випромінювання для фотодеструкції харчових барвників у модельних розчинах.

ЛІТЕРАТУРА:

- Vishnu G., et al. Photodegradation of methylene blue dye using light driven photocatalyst-green cobalt doped cadmium ferrite nanoparticles as antibacterial agents. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 404. 136977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136977>.
- Мельник С. Р., Мельник Ю. Р., Дзіняк Б. О., Піх З. Г. Контроль якості та безпечності харчових продуктів. Навч. посіб. Львів : Видавництво «Левада». 2018. 224 с.
- Савчук Т. І., Кормош Ж. О., Корольчук С. І. Визначення харчових барвників у газованих напоях. *Товарознавчий вісник*. Вип. 14. 2021. С. 78–87.
- Haki M. A., Imgharn A., Aarab N., et al. Efficient removal of crystal violet dye from aqueous solutions using sodium hydroxide-modified avocado shells: kinetics and isotherms modeling. *Water Sci Technol*. 2022. Vol. 85(1). P. 433–448. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.451>
- Sadoq M., Atlas H., Imane S., et al. Elimination of crystal violet from aqueous solution by adsorption on naturel polysaccharide: Kinetic, isotherm, thermodynamic studies and mechanism analysis. *Arabian Journal of Chemistry*. 2024. Vol. 17, Is. 1. 105453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105453>
- Ramirez L. S., Dragotakes Q., Casadevall A. A food color-based colorimetric assay for *Cryptococcus neoformans* laccase activity. *Microbiology Spectrum*. 2024. Vol. 12, Is. 8. DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.00442-24>.
- Boyles C., Schmidtke Sobek S. J. Photostability of organic red food dyes. *Food Chemistry*. 2020. Vol. 315. 126249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126249>.

8. Vidana Gamage G. C., Goh J. K., Choo W. S. Natural blue colourant preparations from blue pea flower and spirulina: A comparison stability study. *Food Chemistry Advances*. 2023. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100457>.
9. Bopape D. A., Ntsendwana B., Mabasa F. D. Photocatalysis as a pre-discharge treatment to improve the effect of textile dyes on human health: A critical review. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Is. 20. e39316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39316>.
10. Pysarenko S., Kaminskyi O., Chyhyrynets O., Denysiuk R., Chernenko V. Photocatalytic destruction and adsorptive processes of methylene blue by potassium titanate. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62(15). P. 7754-7758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.476>.

REFERENCES:

1. Vishnu, G., et al. (2023). Photodegradation of methylene blue dye using light driven photocatalyst-green cobalt doped cadmium ferrite nanoparticles as antibacterial agents. *Journal of Cleaner Production*, 404, 136977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136977>.
2. Melnyk, S. R., Melnyk, YU. R., Dzinyak, B. O., & Pikh, Z. H. (2018). Kontrol yakosti ta bezpechnosti kharchovykh produktiv [Quality and safety control of food products]. Navch. posib. Lviv : Vydavnytstvo «Levada» – Publisher «Levada», 224. [in Ukrainian].
3. Savchuk, T. I., Kormosh, ZH. O., & Korolchuk, S. I. (2021). Vyznachennya kharchovykh barvnykiv u hazovanykh napoyakh [Determination of food dyes in carbonated beverages]. *Tovaroznavchyy visnyk – Commodity Bulletin*. 14, 78–87. [in Ukrainian].
4. Haki, M. A., Imgharn, A., Aarab, N., et al. (2022). Efficient removal of crystal violet dye from aqueous solutions using sodium hydroxide-modified avocado shells: kinetics and isotherms modeling. *Water Sci Technol*, 85(1), 433–448. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.451>.
5. Sadoq, M., Atlas, H., Imane, S., et al. (2024). Elimination of crystal violet from aqueous solution by adsorption on naturel polysaccharide: Kinetic, isotherm, thermodynamic studies and mechanism analysis. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(1), 105453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105453>.
6. Ramirez, L. S., Dragotakes, Q., & Casadevall, A. (2024). A food color-based colorimetric assay for *Cryptococcus neoformans* laccase activity. *Microbiology Spectrum*, 12(8). DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.00442-24>.
7. Boyles, C., Schmidtke Sobeck, S. J. (2020). Photostability of organic red food dyes. *Food Chemistry*, 315, 126249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126249>.
8. Vidana Gamage, G. C., Goh, J. K., & Choo, W. S. (2023). Natural blue colourant preparations from blue pea flower and spirulina: A comparison stability study. *Food Chemistry Advances*, 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100457>.
9. Bopape, D. A., Ntsendwana, B., & Mabasa, F. D. (2024). Photocatalysis as a pre-discharge treatment to improve the effect of textile dyes on human health: A critical review. *Heliyon*, 10(20), e39316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39316>.
10. Pysarenko, S., Kaminskyi, O., Chyhyrynets, O., Denysiuk, R., & Chernenko, V. (2022). Photocatalytic destruction and adsorptive processes of methylene blue by potassium titanate. *Materials Today: Proceedings*, 62(15), 7754–7758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.476>.

Стаття надійшла: 26.08.2025

Прийнято: 05.09.2025

Опубліковано: 10.11.2025