

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 504.06

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/05>

Валюженич О.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Ключник І.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки

СУЧАСНІ ПРИЛАДИ КОЛЬОРОМЕТРІЇ У МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА. МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ

Стаття присвячена екологічному стану навколишнього середовища, який одним із ключових аспектів стало розвинуто суспільства. Окрім цього, якісний моніторинг стану довкілля безпосередньо впливає на вчасність та доцільність природоохоронних заходів та раціональне використання природних ресурсів.

У статті розглянуто кольориметричні методи оцінки якості навколишнього середовища. Вони посідають важливе місце, серед методів аналітичного контролю. Простота, вседоступність, відносна дешевизна та висока швидкість виконання аналізів призвели до численного поширення застосування кольориметричного методу при оцінці стану навколишнього середовища. Крім цього, такі характеристики методу дозволяють застосовувати його навіть в польових умовах, що значно спрощує процес оцінки стану навколишнього середовища. Цей аспект особливо важливий для громадських організацій та освітніх проєктів, що прагнуть долучитися до моніторингу екологічного стану навколишнього середовища.

Досліджено, що з плином часу активно розширюється спектр сучасних засобів кольориметрії, від тест-смужок до портативних фотометрів та спектроколориметрів, і, навіть мобільних додатків для визначення концентрації забруднювача. Така різноманітність методів та приладів відкриває широкі можливості для швидкої та якісної оцінки екологічного стану навколишнього середовища навіть у польових умовах. Разом з тим, таке поширення та доступність сучасних приладів та засобів, може супроводжуватися низкою метрологічних проблем, що впливають на результати досліджень, їх інтерпретацію та відтворюваність. В результаті дослідження виявлено такі можливі проблеми як:

- розбіжності в результатах вимірювання між бюджетними та дорого вартісними приладами вимірювання;*
- вплив зовнішніх факторів на інтерпретацію результатів вимірювання (освітленість, температура, суб'єктивність зорового сприйняття);*
- відсутність єдиних підходів до оцінки похибок та невизначеності результатів вимірювань.*

Ключові слова: екологічний моніторинг, кольориметрія, навколишнє середовище, вимірювання, дослідження, забруднення, похибка, прилади.

Постановка проблеми. Сучасний стан метрології як науки призвів до активного розвитку її засобів та методів. Безпосередньо, це стосується і питання екологічного моніторингу якості навколишнього середовища. Питання розвитку кольориметричного методу та приладів, що використовують цей метод, сьогодні набуло активного розвитку. Незважаючи на такий прогресивний

розвиток сучасних кольориметричних приладів, питання забезпечення їх метрологічної надійності досі залишається неосвітленим. Проблема створюють низка питань, зокрема, відсутність єдиного методу калібрування, що був би універсальним для всіх приладів, та міг би забезпечити точність результатів вимірювань незалежно від типу та призначення приладу. Крім цього, на

© Валюженич О.О., Ключник І.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

точність та відтворюваність результатів досліджень істотно впливають зовнішні чинники, такі як спектральний склад освітленості, температура навколишнього середовища, суб'єктивність зорового сприйняття. Довготривала стабільність та якість відтворювання результатів вимірювань також є суттєвою проблемою у багатьох сучасних цифрових приладах.

Таким чином, актуальною проблемою на сьогодні залишається розгляд основних приладів які базуються на застосуванні кольориметричного методу та які використовуються при оцінці екологічного стану навколишнього середовища. Також, актуальною проблемою є дослідження питання проблем точності результатів вимірювань, отриманих за допомогою приладів, що базуються на використанні кольориметричного методу оцінки екологічного стану навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний стан екологічного середовища характеризується постійним антропогенним навантаженням. Така сучасна ситуація потребує швидких, надійних та доступних методів, що дозволять проводити якісну оцінку екологічного стану навколишнього середовища. Традиційні фізико-хімічні методи дослідження, попри гарну якість результатів, потребують певного дороговартісного обладнання, персоналу та часових витрат. Відповідно, це обмежує використання фізико-хімічних методів в обмежених, польових умовах. Це є причиною активного розвитку альтернативних аналітичних технологій в останні роки. Кольориметрія посідає важливе місце серед альтернативних технологій дослідження екологічного стану навколишнього середовища. Відносна дешевизна, швидкість та гнучкість проведення досліджень, надає кольориметричному методу значні переваги.

Останні досягнення у галузі оптичного розпізнавання та цифрових технологій для смартфонів, дали новий поштовх розвитку та широті застосування кольориметричного методу при оцінці екологічного стану навколишнього середовища. Цьому питанню приділяється значна увага, оскільки через можливість застосування смартфонів, використання кольориметричного методу стане ще більш доступним та поширеним. Це стало можливим завдяки поєднанню стрімкому розвитку технологій, високій роздільній здатності камер, інтегрований оптичних сенсорів та зростаючим обчислювальним можливостям смартфонів. [2, 3]. Крім того, важливим напрямом сучасних досліджень є огляд та систематизація вже існуючих здобутків у галузі кольориметрії. Вчені опи-

сують останні досягнення, прогрес та інновації зроблені протягом 10 років, та відзначають розширення матеріальної бази. У роботі також зосереджено увагу на саме портативних приладах для екологічного моніторингу стану навколишнього середовища, та підкреслюється, що поява таких пристроїв розширює можливості для проведення польових досліджень [6].

Метою статті є аналіз сучасних приладів кольориметрії, що застосовуються у моніторингу екологічного стану навколишнього середовища, з метою оцінки їх метрологічних характеристик, виявлення основних проблем точності та відтворюваності результатів, а також визначення можливих напрямів удосконалення метрологічного забезпечення таких методів.

Виклад основного матеріалу. Ефективне застосування кольориметричного методу, при оцінці екологічного стану навколишнього середовища, неможливе без розуміння основ кольориметричного методу та його приладів, та їх метрологічних характеристик [1]. Необхідно провести метрологічний аналіз приладів, що застосовуються при використанні кольориметричного методу, це дасть можливість оцінити не тільки загальні можливості приладу, а й визначити такі характеристики як чутливість, відтворюваність показників, стабільність показників при різних умовах. Сучасний стан розвитку кольориметрії характеризується широким спектром засобів, від найпростіших та розповсюджених тест-смужок, до смартфонів та мобільних додатків з вбудованими оптичними сенсорами, що неодмінно рухає науку вперед та відкриває нові можливості у питанні оцінки екологічного стану навколишнього середовища [5, 2]. Кожен метод має як свої безсумнівні переваги, так і недоліки, що проявляються у якості похибок вимірювань та складнощів при інтерпретації результатів.

Тому, спершу виникає необхідність в проведенні метрологічного аналізу приладів кольориметрії. Такий підхід дозволить систематизувати вже наявні досягнення та знання в питанні приладів, виявити їх сильні та слабкі сторони а також виявити можливі чинники та обставини, що безпосередньо впливають на точність результатів та наявність похибок. Після цього можна буде перейти до аналізу проблеми неточності вимірювань що виникають у різних умовах.

Таким чином, логіка дослідження побудована на тому, аби спершу заглибитись в фундаментальну основу, провести метрологічний аналіз характеристик та принципів роботи сучасних

методів та приладів кольориметрії. Провівши аналіз таких фундаментальних тем, можна буде здійснити критичний розбір проблеми, що пов'язана з неточністю результатів вимірювань та відтворюваності результатів досліджень при оцінці екологічного стану навколишнього середовища.

Методи кольориметрії. Найбільш поширеним методом кольориметрії є візуальна кольориметрія. Цей метод є одним із найстаріших та найбільш базових методів кольориметрії, оскільки базується на візуальному спостереженні. Суть методу полягає у візуальному спостереженні над зміною кольору реагенту чи індикаторної проби, та порівнянні результату візуального спостереження зміну кольору з еталонною шкалою кольору. Залежно від концентрації речовини, зміни рН або температури змінюються колірні параметри такі як колір, його інтенсивність, чи насиченість. Еталонна шкала кольорів зображена на рис. 1.

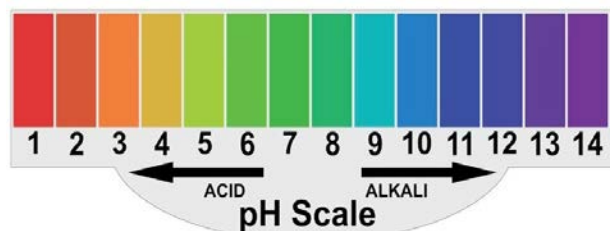


Рис. 1. Еталонна шкала визначення pH розчинів

Візуальний метод в кольориметрії часто застосовується як попереднє, швидке оцінювання за відсутності можливості проведення лабораторних досліджень або в польових умовах, коли потрібно швидко оцінити обстановку та отримати результат без складного обладнання та людського ресурсу. Спочатку досліджувану речовину наносять на спеціальні тест-смужки [5] де зразок досліджуваної речовини контактує з реагентом, що призводить до зміни забарвлення тест-смужки, яке візуально аналізується експертом. Отримані результати порівнюються з еталонною шкалою кольорів та інтерпретуються експертом, який визначає приблизну концентрацію тих чи інших речовин в досліджуваному зразку. Такий метод визначення наявності чи концентрації патогенних речовин в, наприклад, водоймах, при екологічній оцінці якості стану навколишнього середовища, є дуже простим та поширеним, але відносно дієвим. Незважаючи на просту реалізацію та все доступність у складних умовах, метод має низку недоліків. Це і вплив зовнішніх чинників, таких як рівень та температура освітлення під час інтерпретації результатів, так і неможливість визначити низькі концентрації

тієї чи іншої речовини, при використанні візуального методу кольориметрії [7].

Фотометрична кольориметрія. Одним із ключових напрямів розвитку оцінки екологічного стану навколишнього середовища є застосування методу фотометричної кольориметрії. Суть методу полягає у вимірюванні інтенсивності світла яке проходить через досліджуваний зразок після його реакції з барвником. Інтерпретації даних та отримання результатів вимірювання концентрації речовини прямо пов'язані із законом Бугера-Ламберта-Бера, який описує експоненційне зменшення інтенсивності світла, залежно від густини середовища.

На відміну від класичного, візуального методу кольориметрії, де результат часто спотворюється суб'єктивністю зорового сприйняття, фотометричний метод забезпечує більшу точність та надійність. З допомогою фотометричного методу кольориметрії можна отримати більш точну, стандартизовану, та відтворювану оцінку результатів. Саме завдяки таким характеристикам, а також можливості працювати зі зразками з низькою концентрацією патогенної речовини, фотометричний метод набув широкого поширення при екологічному моніторингу стану навколишнього середовища. Цей метод дозволяє оперативно виявити вміст таких сполук як нітратів, фосфатів, важких металів у воді, ґрунті, атмосфері [8, 9].

Натомість, використання методу фотометричної кольориметрії потребує значно більших фінансів аніж візуальний метод. Крім того, аби отримати якісні результати дослідження, необхідно провести певну підготовку зразків в контрольованих умовах, адже прилади досить чутливі до домішок у зразках, що не завжди видається можливим.

Прилади кольориметрії. Одним із базових та найпоширеніших втілень фотометричного методу у кольориметрії стали фотоколориметри (рис. 2). Фотоколориметр для кількісного аналізу вмісту тієї чи іншої речовини у зразку, за зміною інтенсивності забарвлення розчину. На відміну від ще одного приладу, спектрофотометра, що також активно застосовується у кольориметричному методі екологічного моніторингу стану навколишнього середовища, фотоколориметри працюють із обмеженим набором світлофільтрів. З однієї сторони, це робить прилад значно простішим та дешевшим [10], а з іншої, обмежує його спектр використання та його функціональність. Похибка точності фотоколориметрів різних моделей коливається в межах 2-5%, залежно від моделі та умов вимірювання, чутливість достатня для виявлення

речовин у межах мілі- та мікромолярних рівнів. У сучасній науці фотоколориметри використовують не тільки при екологічному моніторингу довкілля, а й у інших галузях, наприклад, у медицині, та харчовій промисловості.



Рис. 2. Фотоколориметр

Одними з найважливіших оптичних приладів сучасної кольориметрії є спектрофотометри Рис 3. Такі прилади використовують для кількісного та якісного вимірювання тієї чи іншої речовини в розчинах, шляхом вимірювання пропускання або поглинання світлових променів в широкому діапазоні хвиль, від ультрафіолету до інфрачервоного світла. Робота з таким широким діапазоном довжин світлових хвиль зумовлюється використанням призми чи дифракційних решіток, які дозволяють точно виділяти будь-яку довжину хвилі. Завдяки цьому використання спектрофотометрів дозволяє отримати ще більш точні результати досліджень порівняно з використанням фотоколориметрів. Залежно від моделі діапазон довжини світлових хвиль складає 190-1100 нм, спектральна роздільна здатність зазвичай складає 1-2 нм, межа виявлення концентрації відповідає мікро- та наномолярним рівням для багатьох органічних та неорганічних сполук, що в разі точніше ніж у фотоколориметрів.



Рис. 3. Спектрофотометр

Такий широкий спектр довжини світлових хвиль, з якими може працювати спектрофотометр, робить метод універсальним, чутливим та точним [10]. Також використання спектрофотометрів дає можливість проводити багатокомпонентний аналіз що можливий як в лабораторних, так і в польових умовах.

Застосування спектрофотометрів має і свої недоліки, такі як висока вартість обладнання, потреба у кваліфікованому персоналі та необхідність попередньої, ретельної підготовки проб та стабільних умов роботи.

Отже, методи та прилади кольориметрії займають ключове місце в моніторингу екологічного стану навколишнього середовища. Їх відносна дешевизна, точність, універсальність та можливість використання в польових умовах роблять кольориметричний метод ключовим і сучасному екологічному моніторингу. Візуальна кольориметрія широко поширена як експрес-метод проведення аналізу, який широко застосовується у вигляді тест-смужок та портативних наборів. Цей метод швидкий та дешевий, характеризується мінімальними вимогами до обладнання та можливістю застосування в польових умовах. У цьому методі проблема неточності вимірювань заключається в суб'єктивності зорового сприйняття, що значно знижує точність результатів. Тому, метод візуальної кольориметрії найкраще підходить для попередніх досліджень та масових скринінгових заходів при оцінці екологічного стану навколишнього середовища.

Застосування фотоколориметрів являє собою наступний етап розвитку досліджень. Завдяки використанню фотоелементів та стандартних світлофільтрів можна забезпечити об'єктивність вимірювань. Такий принцип роботи фотоколориметрів дозволяє оцінювати концентрації патогенних речовин в навколишньому середовищі у лабораторних, чи напівпольових умовах. Суттєвими недоліками залишається обмеженість спектрального діапазону та середня точність [6, 10]. Крім того, на точність результатів вимірювання суттєво впливає якість освітлення. Зміна спектрального складу та інтенсивності освітлення часто приводить до вагомих помилок у кольоровій оцінці. Також, фотоколориметри потребують регулярного повторного калібрування, для забезпечення точності вимірювань.

Використання спектрофотометрів забезпечує принципово інший рівень точності та відтворюваності результатів досліджень. Оскільки спектрофотометри здатні охоплювати широкий спектральний діапазон світлових хвиль, їх використання дає можливість досліджувати навіть безбарвні зразки та проводити багатокомпонентний аналіз. Саме ці прилади забезпечують точність результатів вимірювань, що відповідають міжнародним стандартам. Недоліками використання спектрофотометрів залишається необхідність залучення кваліфікованого персоналу, висока вартість обладнання, а також необхідність попередньої підготовки досліджуваних зразків. Вагомим недоліком використання спектрофотометрів

трів також є зміщення довжини хвилі, що приводить до неточності результатів. Також серед недоліків можна виділити залежність результатів від стабільності джерела освітлення та температури [6].

Висновки. У статті проведено огляд кольориметричного методу оцінки екологічного стану навколишнього середовища, його методів та приладів. Розглянуто останні наукові здобутки у галузі кольориметрії та моніторингу навколишнього середовища, проведено їх аналіз. Проведено огляд та ана-

ліз основних методів кольориметрії, наведено їх основні принципи, переваги та недоліки, оцінено вагу цих методів у сучасному моніторингу екологічного стану навколишнього середовища. Проведено огляд та метрологічний аналіз основних приладів кольориметрії, оцінено переваги та недоліки використання кожного з видів приладів, наведено існуючі проблеми точності, з якими стикаються науковці при використанні кольориметричного методу оцінки екологічного стану навколишнього середовища.

Список літератури:

1. Боголюбов В.М., Сальнікова А.В., Сальнікова О.В. Моніторинг довкілля: навчальний посібник. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2010. 156 с.
2. Colorimetry and Optical Sensing. *Chemosensors*. 13(5). 163. 2025. MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors13050163>.
3. Comparative Evaluation of Colorimetric Sensors for Environmental Monitoring. *International Journal of Smart and Nano Materials*. 2025. Taylor & Francis. DOI: <https://doi.org/10.1080/17518253.2025.2548507>.
4. Low-cost and easy-to-use: A portable photometer for environmental monitoring. *Microchemical Journal*. 198. 107677. 2025. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.107677>.
5. Recent advances in paper-based analytical devices (PADs) for environmental monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 2025. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06636-6>.
6. Recent Progress in Smartphone-Based Colorimetric Detection for Environmental Monitoring. *Sensors*. 23(5). 2749. 2023. MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23052749>.
7. Comparative Analysis of Low-Cost Portable Spectrophotometers for Colorimetric Accuracy. *Sensors*. 24(24). 8208. 2024. MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24248208>.
8. Spectrophotometric Analysis of Nitrate and Phosphate Contamination in Water Samples. *Science of the Total Environment*. 2025. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.1704150>.
9. Use of Photometric Colorimetry in Environmental Monitoring. *Наукові праці СумДУ. Серія Хімія*. №2. 2022. С. 190. URL: https://chem.teset.sumdu.edu.ua/images/articles/2022/stpv-2022_2.pdf.
10. Validation of Portable Spectrophotometers in Environmental Analysis. PMC – National Center for Biotechnology Information, 2025. PMID: 12251617. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12251617>.

Valuzhenych O.O., Klyuchnyk I.I. MODERN COLOURIMETRY DEVICES IN MONITORING THE ECOLOGICAL STATE OF THE ENVIRONMENT. METROLOGICAL ANALYSIS AND ACCURACY ISSUES

The article is devoted to the ecological state of the environment, which is one of the key aspects of sustainable development of society. In addition, high-quality monitoring of the state of the environment directly affects the timeliness and expediency of environmental protection measures and the rational use of natural resources.

The article discusses colorimetric methods for assessing the quality of the environment. They occupy an important place among analytical control methods. Simplicity, accessibility, relative cheapness, and high speed of analysis have led to the widespread use of the colorimetric method in assessing the state of the environment. In addition, these characteristics of the method allow it to be used even in field conditions, which greatly simplifies the process of assessing the state of the environment. This aspect is especially important for public organisations and educational projects that seek to participate in monitoring the ecological state of the environment.

Research shows that over time, the range of modern colorimetry tools has been actively expanding, from test strips to portable photometers and spectrophotometers, and even mobile applications for determining pollutant concentrations. Such a variety of methods and devices opens up wide opportunities for rapid and high-quality assessment of the ecological state of the environment, even in field conditions. At the same time, such widespread availability of modern devices and tools may be accompanied by a number of metrological problems that affect the results of research, their interpretation and reproducibility. The study identified the following potential problems:

- discrepancies in measurement results between budget and expensive measuring instruments;
- the influence of external factors on the interpretation of measurement results (illumination, temperature, subjectivity of visual perception);
- the lack of a unified approach to assessing errors and uncertainties in measurement results.

Key words: environmental monitoring, colorimetry, environment, measurement, research, pollution, error, instruments.

Дата надходження статті: 22.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025