

УДК 681.518.3: 535.243.2

В. Г. ПЕТРУК<sup>1</sup>, С. М. КВАТЕРНЮК<sup>1</sup>, О. Є. КВАТЕРНЮК<sup>1</sup>, О. І. МОКАНЮК<sup>2</sup>,  
А.О. СЛОБОДЯНЮК<sup>1</sup>

**АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ  
ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ  
БІОТКАНИН У СУДОВО-МЕДИЧНІЙ ЕКСПЕРТИЗИ**

<sup>1</sup> *Вінницький національний технічний університет,  
21010, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна,  
E-mail: petrukvg@gmail.com*

<sup>2</sup> *Вінницький національний медичний університет ім. М. І.Пирогова,  
21018, Пирогова, 56, Вінниця, Україна, E-mail: mokanuk@mail.ru*

**Анотація.** Здійснено аналіз сучасних оптичних методів вимірювального контролю та діагностування параметрів біотканин відповідно до прикладних задач судово-медичної експертизи. Проаналізовано особливості застосування методу цифрової колориметрії для діагностики різного типу патологій.

**Аннотация.** Осуществлен анализ современных оптических методов измерительного контроля и диагностики параметров биотканей в соответствии с прикладными задачами судебно-медицинской экспертизы. Проанализированы особенности применения метода цифровой колориметрии для диагностики различного типа патологий.

**Abstract.** We analyzed the modern methods of measuring optical control and diagnostics of parameters of biological tissues of human skin to applied problems forensics. The features of the method of digital colorimetry for diagnosis of different types of pathologies.

**Ключові слова:** цифрова колориметрія, біотканини шкіри людини, судово-медична експертиза

**ВСТУП**

Вимірювання оптичних параметрів біотканин дає можливість отримати об'єктивну інформацію про просторовий розподіл у ній різних біологічних хромофорів шкіри та її структуру, що можливо використовувати для вимірювального контролю та діагностування різного типу патологій для задач судової медицини. Для підвищення точності діагностування стану біотканин та зменшення похибок визначення їх параметрів необхідно вдосконалювати оптичні методи, що дозволяють досліджувати оптичні характеристики пошкоджених біотканин — спектр коефіцієнту дифузного відбивання, колір ушкоджених ділянок, флуоресценцію біотканин в ультрафіолетовому світлі тощо.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**

Стан поверхневих патологій біотканин суттєво впливає на їх колір, а тому аналіз та класифікація поверхневих патологій біотканин за кольором особливо актуальні для судово-медичної діагностики. Вирішуючи зворотну оптичну задачу можливо визначити біофізичні характеристики поверхневих патологій за кольором. Метою дослідження є аналіз існуючих оптичних методів діагностування поверхневих пошкоджень біотканин, що буде використано в подальшому для вдосконалення методу цифрової колориметрії і вимірювання координат кольору нормальних і ушкоджених ділянок біотканин шкіри людини.

**АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ  
ПОВЕРХНЕВИХ УШКОДЖЕНЬ БІОТКАНИН**

Оптичні методи дозволяють досліджувати значну кількість біофізичних характеристик приповерхневого шару нормальних та патологічних біотканини шкіри людини. В основі оптичних методів лежить взаємодія оптичного випромінювання з біотканинами. Проаналізуємо основні з них.

Існуючі методи визначення оптичних параметрів біотканин можна умовно класифікувати за способом, яким визначаються оптичні параметри середовища (прямі і непрямі), і за умовами їх визначення (in vitro або in vivo) [1].

В даний час розроблено ряд методів, що дозволяють вивчити оптичні властивості різних біотканин як в ультрафіолетовій, так і у видимій і ближній інфрачервоній областях спектра [1—2].

Результати вимірювань отримано при дослідженні біотканин в умовах *in vitro* так і в умовах *in vivo*. При цьому спостерігається широкий розкид значень оптичних параметрів біотканин, причинами якого є відмінності в методиках підготовки та проведення експерименту.

Вимірювання в умовах *in vivo* мають певну перевагу перед *in vitro*, оскільки при цьому не виникає необхідності враховувати зміни у біотканині в процесі біопсії та пробопідготовки. Оптичні характеристики живої біотканини виміряні *in vivo* суттєво відрізняються від результатів вимірювань в умовах *in vitro*. Результати *in vivo* досліджень дають можливість отримувати інформацію про зміни фізіологічного стану, біофізичну структуру та біохімічні процеси у патологічно змінених біотканин, що особливо важливо для прикладних задач судово-медичної експертизи. В свою чергу оптичні характеристики зразків біотканин виміряні *in vitro* поступово змінюються за рахунок біохімічних процесів їх деструкції під впливом навколишнього середовища.

Метод спектроскопії відбивання давно використовується у біомедичній діагностиці і є одним з найбільш поширених методів діагностики біотканин. Хоча метод спектроскопії відбивання, заснований на вимірюванні спектру дифузно розсіяного назад випромінювання біотканиною, використовується досить давно, останні досягнення в області оптоелектроніки та комп'ютерних технологій дали цьому нові можливості і дозволили перетворити спектроскопію відбивання біотканин у поширений і популярний метод діагностики. Зокрема, метод дає можливість проведення *in vivo* кількісних вимірювань еритеми і пігментації шкіри, оцінювання кольору біотканини та з'ясування причин його зміни і т.д.

Раніше моделювання поширення світла в біотканинах ґрунтувалося на моделях, що описують окремі випадки стану біотканини (наприклад, нормальну інтактну шкіру, біотканину шкіри з еритемою, біотканину шкіри з певним типом пігментації і т. д.). Однак ці моделі не дозволяють адекватно описати динаміку зміни спектру дифузного відбивання шкіри в процесі певних зовнішніх впливів, що призводять до змін її оптичних параметрів. Це стосується зміни структури біотканини чи концентрації біологічних хромофорів у ній, що призводять до змін її оптико-фізичних властивостей. Необхідність розробки такої моделі обумовлена також тими причинами, що вона дає можливість розроблення засобів діагностики, які орієнтовані на певний тип патологій. Описані особливості методу спектроскопії відбивання в умовах *in vivo* повною мірою можна віднести і до іншого добре відомого методу діагностики біотканин — флуоресцентної спектроскопії. Автофлуоресценція біотканин успішно використовується в діагностичних цілях у різних галузях медицини, зокрема, судово-медичній діагностиці [3, 4]. Велика частина опублікованих робіт з *in vivo* спектроскопії відбивання біотканин присвячена дослідженням шкірної тканини, що є, з одного боку, найбільш доступною біотканиною людини, а з іншого боку, — однієї з найбільш складних біологічних структур [5].

В останні роки значно зріс інтерес до такого методу дослідження біотканин, як метод цифрової візуалізації, заснований на комп'ютерній обробці експериментально отриманих зображень поверхні біотканини. Метод цифрової візуалізації знайшов різні застосування в дерматології [6], проте в основі всіх цих застосувань лежить простий RGB-аналіз зображення поверхні біотканини, що обмежує можливості методу цифрової візуалізації. Питання візуалізації, документування, моніторингу, вимірювання та класифікації морфологічних проявів різних процесів у біотканині шкіри є областю використання методу цифрової візуалізації, заснованого на комп'ютерній обробці експериментально отриманих зображень поверхні шкіри.

Для прикладних задач судово-медичної експертизи актуальним є аналіз концентрації пігментів у приповерхневому шарі патологічно уражених біотканини за допомогою вимірювання координат кольору елементів цифрового зображення на основі методу цифрової колориметрії. Аналіз цифрових зображень з використанням різних лінійок кольорів широко використовують у медичній діагностиці.

Використання координат кольору та інших характеристик кольору об'єктів, за умов вимірювання, що забезпечують надійність та відтворюваність досліджень, дозволяють оперативно отримати діагностичну інформацію для прикладних задач судово-медичної експертизи. Діагностика за характеристиками кольору як інтегрального параметра, що дозволяє оцінювати стан об'єкта дослідження є особливо актуальною.

Сучасні колориметри успішно застосовуються в якості діагностичних приладів [7], при цьому особливий інтерес викликають колориметри, які вимірюють колірні характеристики відбитого шкірою світла певних спектральних інтервалів, відповідних областям поглинання основних хромофорів, і відповідно, дозволяють отримати інформацію про їх кількісний вміст у біотканині. Однак існуючі прилади даного класу засновані на наближених моделях шкірної тканини, що виражається в досить грубих кількісних оцінках вмісту хромофорів в біотканині.

Альтернативним методом дослідження біотканин є метод мультиспектральної візуалізації, заснований на унікальній комбінації просторових і спектральних вимірювань і широко використовується в даний час [8]. Різні об'єкти стають видимими в різних спектральних смугах, даючи можливість

отримати функціональну «карту» об'єкта, показуючи тип і область локалізації вмісту певних хромофорів та змін функціональної структури всередині біотканини.

Однією з переваг оптичних методів дослідження біологічних середовищ є можливість отримання інформації про середовище шляхом аналізу поляризаційних характеристик розсіяного середовищем випромінювання. Аналіз поляризаційних характеристик розсіяного світла завжди відіграв важливу роль у дослідженнях взаємодії поляризованого випромінювання з неоднорідними середовищами, в тому числі біотканинами, оскільки поляризаційна структура світлових полів, що виникає при розсіюванні за певних умов виявляється чутливою до змін умов взаємодії випромінювання з середовищем.

У засобах оптичної діагностики стану нормальних і патологічних біотканин в залежності від використаного методу джерело зонduючого випромінювання може працювати у різному режимі [2, 3, 9]:

— неперервне джерело випромінювання, інформативним вимірюваним параметром є інтенсивність випромінювання (найбільш поширений, найбільш дешеві оптичні давачі);

— імпульсне джерело випромінювання, інформативним параметром є часовий зсув між імпульсами (вимагає високої швидкодії, що збільшує вартість оптичних давачів та допоміжного обладнання);

— джерело випромінювання з фазовою модуляцією, інформативним параметром є зсув фаз (метод більш

простий та надійний у порівнянні з використанням імпульсного джерела).

Відповідно до наведених класифікаційних ознак класифікація оптичних методів вимірювального контролю та діагностування стану нормальних та патологічних біотканин шкіри людини наведена на рис. 1.

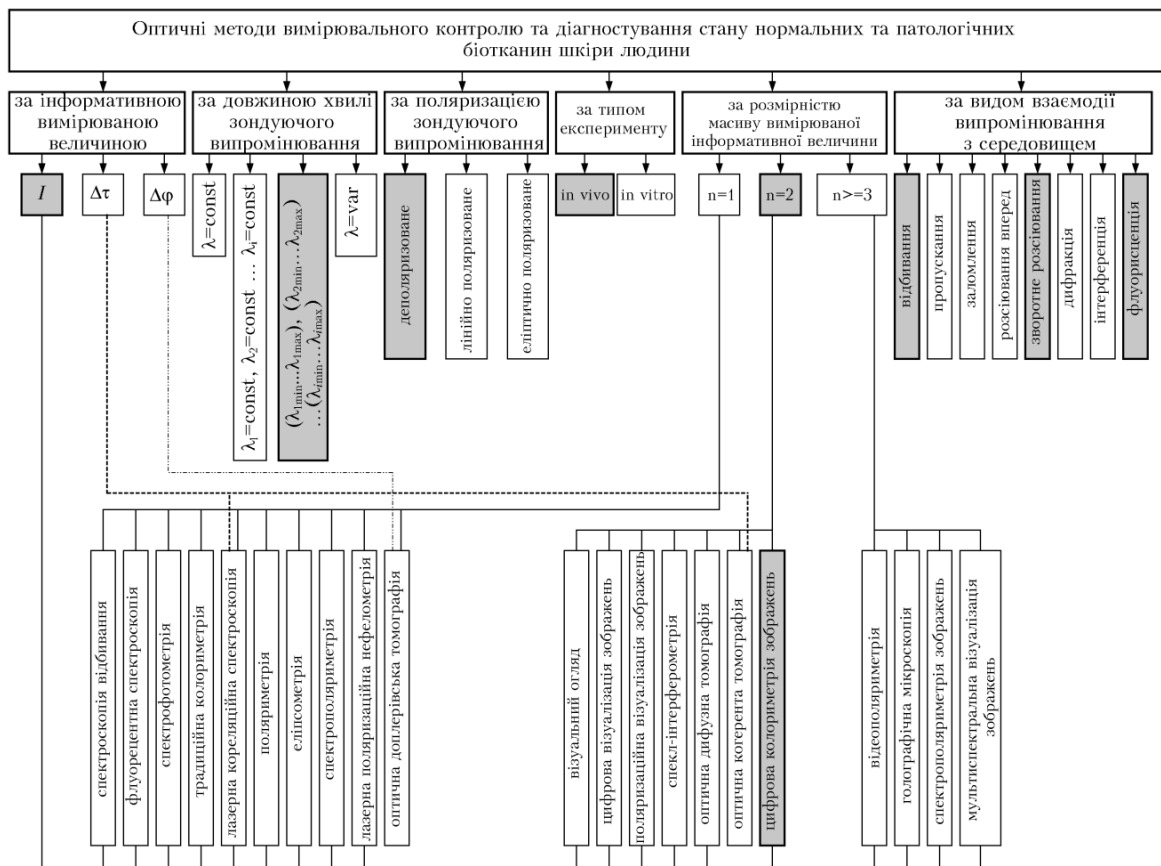


Рис. 1. Класифікація оптичних методів вимірювального контролю та діагностування стану нормальних та патологічних біотканин шкіри людини

### АНАЛІЗ КОЛОРИМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ НОРМАЛЬНИХ ТА ПАТОЛОГІЧНИХ БІОТКАНИН

Всі існуючі колориметричні методи вимірювання координат кольору прийнято розділяти на візуальний, розрахунковий і об'єктивний методи [10] (див. рис. 2.). За принципом роботи

колориметричні методи можна розділити на одночасні і послідовні. Також колориметричні методи можливо розділити за тим, де формуються кольороподільні сигнали у опромінювані чи у приймачі.

Розрахунковий метод ґрунтується на законі адитивності і вимагає вимірювання спектральних коефіцієнтів пропускання або відбивання об'єкта і використання функцій додавання кольорів у поєднанні з відомим спектральним розподілом енергії в джерелі освітлення. Розрахунковий метод застосовується головним чином для атестації стандартних зразків кольору. Перевагою методу є висока точність вимірювань координат кольору, недоліками методу є низька швидкодія за рахунок послідовного сканування спектру, висока вартість та значні габарити пристрою. Оскільки прилад вимірює усереднене значення координат кольору для ділянки об'єкта, який потрапив у робоче вікно первинного вимірювального перетворювача, то досліджувати розподіл пігментів чи структурні зміни по поверхні біотканини не можливо.

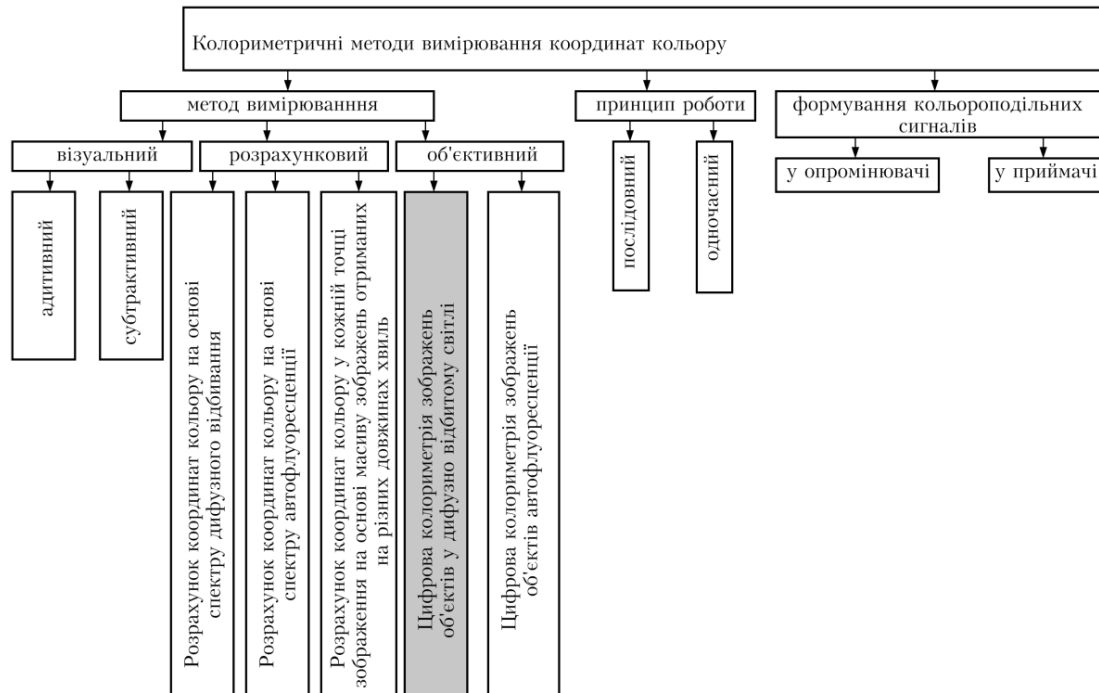


Рис. 2. Класифікація колориметричних методів вимірювання координат кольору нормальних та патологічних біотканин шкіри людини

У візуальному методі колір об'єкта візуально порівнюється з сумішшю трьох основних кольорів колориметра у відповідній пропорції. Параметри основних кольорів у суміші є координатами досліджуваного кольору в системі кольорів даного колориметра.

Візуальні колориметри за принципом змішування кольорів діляться на два основні класи [10]: адитивні і субтрактивні. У адитивних колориметрах вимірюваний колір урівнюється кольором, отриманим в результаті складання трьох основних кольорів приладу, взятих в належних пропорціях, наприклад шляхом накладання на білому екрані трьох потоків світла, що пройшли через три світлофільтра. Існують також адитивні колориметри, у яких основними кольорами є монохроматичні випромінювання [11].

У субтрактивних колориметрах колір поля порівняння утворюється в результаті послідовного проходження потоку світла через кольорові світлофільтри. Колориметри з субтрактивним змішуванням кольорів виготовляються значно рідше адитивних, оскільки їх складніше градувати.

Тривалість візуальних вимірювань і наступна трудомістка обробка результатів обмежують застосування візуальних колориметрів. А індивідуальні відмінності в властивостях сприйняття кольорів оком спостерігача призводять до того, що візуальні визначення кольору, виконані різними спостерігачами, розходяться як між собою, так і з результатами розрахунку, отриманими за кривими змішування стандартного спостерігача. Ці основні недоліки візуальних колориметрів послужили причинами їх заміни на об'єктивні колориметри.

Розвиток методу цифрової колориметрії відповідає основним тенденціям сучасної медичної діагностики, до яких відносять автоматизацію та комп'ютеризацію вимірювань. Останнім часом метод цифрової колориметрії використовують для розвитку експрес-методів діагностики [11].

Поява і розвиток цифрових фотокамер, планшетних сканерів і комп'ютерних програм обробки кольорових цифрових зображень дала можливість для швидкого, об'єктивного та автоматизованого способу отримання колориметричних параметрів [12]. Переваги цифрової колориметрії, як аналітичного методу полягають у підвищенні чутливості і селективності визначення різних речовин, у можливості дослідження концентрації певних пігментів у неоднорідному біологічному середовищі, а також при побудові градувальних тест-шкал для візуального визначення компонент у експрес-методах аналізу [13].

В об'єктивному методі функції додавання кольорів відтворюються за допомогою фотоелектричних приймачів при неодмінному дотриманні умови відповідності між спектральними характеристиками цих приймачів, виразам для розрахунку координат кольору в одній із стандартизованих систем кольорів [10]. Особливість цього методу полягає в тому, його можливо застосовувати лише при наявності зразків кольору, з попередньо атестованими колориметрично показниками, визначеними спектрофотометричним методом з похибкою не більше 1%. У якості зразків для порівняння можуть бути використані зразки з атласів і наборів стандартних зразків кольору, атестовані контрольні зразки (еталони) кольору та інші. Перевагою методу є висока швидкодія, зменшення вартості та габаритів. Крім того, за рахунок обробки цифрових зображень з'являється можливість досліджувати розподіл пігментів чи структурні зміни по поверхні біотканини. Недоліками методу є зменшення точності вимірювань.

### ВИСНОВКИ

Для підвищення вірогідності контролю стану біотканин та зменшення похибок визначення їх параметрів необхідно вдосконалювати методи, що дозволяють точно визначати колір їх ушкоджень. На основі результатів обробки кольору ушкоджень та виміряних геометричних параметрів ушкодженої ділянки можливо діагностувати стан біотканини та визначити її параметри, що необхідні для конкретної прикладної задачі. Отже, в результаті здійсненого аналізу сучасних методів вимірювального контролю та діагностування нормальних і патологічних біотканин виявляється необхідність в подальшому розвитку оптичних колориметричних методів відповідно до задач судово-медичної експертизи.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тучин В. В. Исследование биотканей методами светорассеяния / В. В. Тучин // Успехи физ. наук. — 1997. — Т. 167. — № 5. — С. 517—539.
2. Тучин В. В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях / В. В. Тучин. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1998. — 384 с.
3. Приезжев А. В. Лазерная диагностика в биологии и медицине / А. В. Приезжев, В. В. Тучин, Л. П. Шубочкин — М. : Наука, 1989. — 238 с.
4. Анализ точности лазерной клинической флюоресцентной диагностики / Д. А. Рогаткин, О. А. Приснякова, Л. Г. Моисеева и др. // Измерительная техника. — 1998. — № 7. — С. 58—61.
5. Odland G. F. Structure of the Skin in: Goldsmith LA. (Ed.), Physiology, Biochemistry and Molecular Biology of the Skin, Oxford University Press, Oxford, 1991, P. 3—62.
6. Kenet R. D. Digital imaging in dermatology / R. D. Kenet // Clinics in Dermatology. — 1995. Vol. 13. — № 4, P. 381—392.
7. Duteil L. Colorimetric assessment of the effects of azelaic acid on light-induced skin pigmentation / L. Duteil, J. P. Ortonne // Photodermatol. Photoimmunol Photomed. — 1992. — № 9(2), P. 67—71.
8. Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems / C. A. Wessman, J. D. Aber, D. L. Peterson [et. al.] // Nature. — 1988. — Vol. 335(6186). P. 154—156.
9. Introduction to light scattering by biological objects / N. G. Khlebtsov, I. L. Maksimova, V. V. Tuchin [et. al.] // Handbook of optical biomedical diagnostics / [ed.: V. V. Tuchin]. — Bellingham, WA: SPIE Press, 2002. — P. 31—167.
10. Юстова Е. Н. Цветовые измерения (Колориметрия) / Е. Н. Юстова. — СПб. : Издательство С.-Петербургского университета, 2000. — 397 с.
11. Malacara-Nemandez D. Color vision and colorimetry: Theory and applications / D. Malacara-Nemandez. — Bellingham : SPIE Optical Engineering press. — 2002. — 176 p.
12. Ohno Y. Color issues of white LEDs. / Y. Ohno. — OIDA workshop preliminary report 2000. — 103 p.
13. Rich D. The effect of measuring geometry on computer color matching / D. Rich // Color research and application. — 1988, — № 13. — P. 113—118.

Надійшла до редакції 10.06.2015 р.

**ПЕТРУК В. Г.** — д.т.н., професор, директор Інституту екологічної безпеки та моніторингу довкілля, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, Україна.

**КВАТЕРНЮК С. М.** — к.т.н., старший науковий співробітник кафедри екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, Україна.

**КВАТЕРНЮК О. Є.** — здобувач кафедри екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**МОКАНЮК О. І.** — к.м.н., доцент кафедри патологічної анатомії, судової медицини та права, Вінницький національний медичний університет ім. М.І.Пирогова, м. Вінниця, Україна.

**СЛОБОДЯНЮК А. О.** — студент 2 курсу кафедри екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.