

# РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Вінницький національний технічний університет

***Анотація** Проведено аналіз математичних моделей та вдосконалення методів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю і діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ. Проведено математичне моделювання переносу випромінювання у приповерхневих шарах неоднорідних біологічних середовищ на основі багатощарової структури. Проведено математичне моделювання переносу випромінювання у приповерхневих шарах неоднорідних біологічних середовищ з частинками різних розмірів та форми. Проведено математичне моделювання формування масивів мультиспектральних зображень неоднорідних біологічних середовищ. Розроблено та вдосконалено методи мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ.*

**Ключові слова:** мультиспектральний контроль, неоднорідні біологічні середовища, засіб контролю, телевізійний вимірювальний контроль, спектральні характеристики.

***Abstract** The analysis of mathematical models and improvement of methods of multispectral television measurement control and diagnostics of heterogeneous biological media parameters is carried out. Mathematical modeling of radiation transfer in near-surface layers of inhomogeneous biological media on the basis of a multilayer structure is carried out. Mathematical modeling of radiation transfer in near-surface layers of inhomogeneous biological media with particles of various sizes and shapes has been carried out. Mathematical modeling of the formation of multispectral images of heterogeneous biological media was carried out. The methods of multispectral television measurement control and diagnostics of heterogeneous biological media parameters have been developed and improved.*

**Keywords:** multispectral control, heterogeneous biological environment, control means, TV measurement control, spectral characteristics.

## Вступ

Даний проект передбачає проведення дослідження і розроблення методів та засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ для ряду прикладних задач екологічного моніторингу [1, 5, 6, 9, 11], біомедициної діагностики [2–4, 10, 12] та контролю якості продукції [7] з використанням n-вимірної мультиспектральної інформації для кожного пікселя масиву цифрових зображень отриманих ПЗЗ-камерою, що дозволить розвинути нові концепції та методи телевізійного вимірювального контролю та діагностування, а також підвищити швидкість та вірогідність контролю параметрів біологічних об'єктів. Прикладні результати роботи можуть мати подвійне використання, що має особливо важливе значення для підвищення обороноздатності та національної безпеки держави. Зокрема, планується розроблення мультиспектральних телевізійних засобів діагностування характеру та ступеню тяжкості механічних ушкоджень при застосуванні вогнепальних боєприпасів на біоманекенах, біолого-фізіологічні властивості біотканин шкіри яких наближені до морфо-функціональних параметрів людини, що дозволяє здійснювати фізичне моделювання ушкоджень тіла внаслідок пострілу з вогнепальної зброї та прогнозувати розвиток посттравматичного процесу у людини.

Мета роботи – підвищення швидкодії, вірогідності контролю та точності діагностування шляхом вдосконалення методів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

### **Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль**

Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль та діагностування займають важливе місце при вирішенні прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції. Проте, на даний час, вони розвинуті недостатньо і потребують продовження досліджень з метою підвищення точності діагностування, швидкодії та вірогідності контролю. Авторами запропоновано пристрій для телевізійного вимірювального контролю та діагностики параметрів кольору неоднорідних середовищ, що дозволяє визначити координати кольору елементів зображення досліджуваного об'єкта у системі координат CIEXYZ та CIELAB за умови дифузного освітлення з наступним визначенням найближчих кольорів зі шкали зразків кольорів та визначення параметрів об'єкту з використанням експертної системи. Запропоновано спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю екологічного стану водних об'єктів за параметрами фітопланктону за допомогою проточного мультиспектрального телевізійного вимірювального аналізатора частинок неперервної дії, при якому порівнюють зображення частинок на характеристичних довжинах хвиль пігментів за допомогою ПЗЗ-камери з зображеннями з бази даних у режимі реального часу, визначають чисельність частинок фітопланктону та розраховують індекси біорізноманіття. Розроблено автоматизований метод та засіб контролю стану біотканин за їх спектрофотометричними параметрами, суть якого полягає у неінвазійному вимірюванні спектральних коефіцієнтів дифузного відбивання об'єктів контролю і порівнянні їх з нормою та використанні отриманих результатів як вхідного параметру експертної системи.

Телевізійний вимірювальний контроль та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ може здійснюватись на основі обробки масивів мультиспектральних зображень об'єкта отриманих ПЗЗ камерою на характеристичних довжинах хвиль. Проект продовжує науковий напрямок авторського колективу у дослідженні методів та засобів спектрофотометрії, спектрополяриметрії, цифрової колориметрії та вимірювання координат кольору, телевізійного контролю стану біологічних об'єктів. На основі статистичної обробки спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбивання можливо визначити відмінності для об'єктів контролю, що перебувають у придатному чи непридатному стані у випадку прикладних задач контролю якості продукції чи контролю забруднення. У випадку прикладних задач діагностування статистичні відмінності спектральних характеристик визначаються для двох чи більше станів досліджуваного об'єкта. Відмінність у коефіцієнті дифузного відбивання, вимірюваному на певній довжині хвилі та при визначеному значенні діапазону довжин хвиль для вимірювального каналу дозволяє з певною вірогідністю розрізнити придатний об'єкт від непридатного. При переході від спектрофотометрії дифузного відбивання до мультиспектрального телевізійного методу з'являється можливість порівнювати коефіцієнти дифузного відбивання чи пропускання для кожного пікселя зображення на  $n$  довжинах хвиль, причому діапазон довжин хвиль у кожному з вимірювальних каналів може відрізнитись. Тому при побудові мультиспектрального телевізійного засобу необхідно спочатку вирішити задачу створення оптимальної структури пристрою, а саме оптимальної кількості спектральних каналів, діапазону довжин хвиль кожного з каналів та необхідної роздільної здатності ПЗЗ-камери, що забезпечуватиме необхідні параметри швидкодії, вірогідності контролю чи точності діагностування. При застосування цифрової колориметрії та вимірюванні координат кольору визначається відмінність у кольорі для нормальної і патологічної ділянки біотканини, як відстань між точками у тривимірному просторі координат кольору CIEXYZ чи CIELAB. Крім того, координати кольору порівнюються з координатами шкали кольорів, що відповідають відомим діагностичним станам об'єкту. При переході від цифрової колориметрії до мультиспектрального телевізійного методу відмінність між нормальною та патологічною ділянкою визначається у  $n$ -вимірному мультиспектральному просторі для кожного пікселя зображення, що дозволяє оптимізувати структуру засобу під роботу на тих довжинах хвиль і у тих діапазонах, де відмінності будуть найбільш помітні, і, таким чином, підвищити вірогідність контролю. Крім того, прикладні результати роботи можуть мати подвійне використання, що має особливо важливе значення для підвищення обороноздатності та національної безпеки держави. Зокрема, у роботі

планується розроблення мультиспектральних телевізійних засобів діагностування характеру та ступеню тяжкості механічних ушкоджень біотканин при застосуванні боєприпасів Форт-11 та Форт-12 на біоманекенах, біолого-фізіологічні властивості шкіри та підлеглих тканин яких наближені до морфо-функціональних параметрів людини, що дозволяє здійснювати фізичне моделювання ушкоджень тіла внаслідок пострілу з вогнепальної зброї та прогнозувати розвиток посттравматичного процесу у людини.

Аналіз сучасних досліджень по даній тематиці показав, що велика кількість дослідників у світі використовує мультиспектральний метод у наукових дослідженнях, однак метрологічні аспекти його застосування вивчені недостатньо, тому актуальним буде аналіз метрологічних характеристик мультиспектральних вимірювальних засобів, розробка методик проведення мультиспектральних досліджень відповідно до типових прикладних задач, що дасть можливість включити мультиспектральні вимірювальні засоби у реєстр засобів вимірювальної техніки.

Актуальність теми обумовлена необхідністю постійного підвищення вірогідності контролю параметрів неоднорідних біологічних середовищ у прикладних задачах екологічного моніторингу, біомедицинської діагностики та контролю якості продукції, що зумовлює необхідність розроблення нових мультиспектральних телевізійних методів та засобів.

Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ здійснюється на основі обробки масиву мультиспектральних зображень досліджуваного об'єкту отриманих ПЗЗ камерою на  $n$  довжинах хвиль з вибраними діапазонами довжин хвиль у кожному з вимірювальних каналів. Вибір оптимальної кількості спектральних каналів, діапазону довжин хвиль кожного з каналів та необхідної роздільної здатності ПЗЗ-камери здійснюється при оптимізації структури вимірювального засобу на основі пошуку відмінностей при статистичній обробці спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбивання досліджуваних об'єктів, з апіорі відомим станом, що забезпечує необхідні параметри швидкодії, вірогідності контролю чи точності діагностування. Відмінність між придатним та непридатним об'єктом визначається, як відстань у  $n$ -вимірному мультиспектральному просторі для кожного пікселя з масиву мультиспектральних зображень. Крім того, координати у  $n$ -вимірному мультиспектральному просторі елементів зображення порівнюються з координатами шкали, що відповідають відомим станам досліджуваного об'єкту. Для опрацювання масивів мультиспектральних зображень буде використано експертну систему підтримки прийняття діагностичного рішення з використанням нечіткої логіки чи нейромережі.

На першому етапі проведено аналіз математичних моделей та вдосконалення методів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю і діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ. Проведено математичне моделювання переносу випромінювання у приповерхневих шарах неоднорідних біологічних середовищ на основі багаточислової структури. Проведено математичне моделювання переносу випромінювання у приповерхневих шарах неоднорідних біологічних середовищ з частинками різних розмірів та форми. Проведено математичне моделювання формування масивів мультиспектральних зображень неоднорідних біологічних середовищ. Розроблено та вдосконалено методи мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

## Висновки

1. На основі моделювання переносу випромінювання в біотканинах побудовано алгоритм визначення структурних і біофізичних параметрів шкіри, що визначають світлові поля всередині і поза межами середовища. Вказані параметри мають коректні значення, типові для світлої нормальної шкіри. Запропонована методика може бути корисною для біологів і медиків, що займаються дослідженнями, діагностикою та практичним лікуванням шкірного покриву людини і його патологій.

2. Розроблено методики та алгоритми відновлення структурних і біофізичних параметрів шкіри за спектрами КЯ розсіяного назад поляризованого світла і характеристикам розсіяного випромінювання, що вимірюється з просторовим розділенням. Невеликі зміни показника поглинання дерми, що зумовлюють залежність вимірюваної характеристики від  $S$  і  $D$ , призводять до малих варіацій реєструемого оптичного сигналу.

3. Епідерміс як верхній шар шкіри затримує частину падаючого на неї випромінювання і послаблює світлове поле в глибині середовища. Для аналізу щільності випромінювання всередині

середовища епідерміс завжди слід розглядати як розсіюючий і поглинаючий шар, оскільки модель фільтра може давати великі похибки. Отримані результати можна використовувати в аналітичних і чисельних схемах розрахунку характеристик світлових і теплових полів в біологічних тканинах з метою спрощення, де це можливо, структури середовища.

4. Спектральні характеристики розсіювання і поглинання світла можна використовувати для діагностики крові та еритроцитів. У випадку суспензії еритроцитів, має місце залежність оптичної щільності від розмірів частинок. Для прямого визначення концентрації поглиначів за значеннями  $D(\lambda)$  слід знати ці розміри, а з іншого, вимірювання  $D(\square)$  дозволяють ставити питання про розв'язання різних зворотних задач оптики дисперсних середовищ, включаючи визначення розмірів еритроцитів чи їх агрегатів.

5. Шляхом теоретичного моделювання показано, як можна відновити структурні і біофізичні параметри шкіри (об'ємні концентрації меланіну і кровоносних судин, товщину епідермісу, середній діаметр капілярів і ступінь оксигенації крові) на основі вимірюваного спектру КДВ. Для успішного відновлення відносна похибка повинна становити менше 1%. Відновлені параметри шкіри можна використовувати для визначення глибини проникнення світла у тканину.

6. Методом математичного моделювання досліджені спектральні значення коефіцієнтів поглинання всієї шкіри в цілому і її хромофорів – меланіну, крові, окси- і деоксигемоглобіну, тканини-основи. Тканина-основа, володіючи мінімальним показником  $\mu_w(\lambda)$  з усіх компонент шкіри, буде найбільш сильно інтегрально поглинати світло в ближній ІЧ області.

7. На основі аналітичної методики оцінювання параметрів спекл-структури, що формується світлом, багатократно розсіяним багатшаровими біотканинами, розраховані глибинна структура освітленості від не розсіяної, дифракційної і дифузійної компонент у макроскопічно однорідних шарах шкіри у діапазоні довжин хвиль 400–800 нм. Також розрахована глибинна структура некогерентного фону при широкій варіації структурних (товщина епідермісу) і біофізичних параметрів тканини – об'ємної концентрації меланіну  $C_m$  у епідермісі і капілярів  $C_b$  у дермі, ступеня оксигенації  $S$ . Отримані результати можуть стати основою для створення нових і вдосконалення відомих методів вивчення взаємодії світла з біотканинами, що дозволить розширити число споживачів, включаючи медиків-практиків, біологів і т.д.

В подальшому планується розвиток отриманих результатів на випадок рухомих розсіювачів і побудова аналітичних зв'язків між параметрами спекл-картини і різними характеристиками рухомих частинок (наприклад, еритроцитів) і середовища, в якому вони переміщуються. Очевидно, що функціональні можливості спекл-оптичних методів діагностики біотканин при цьому істотно розширюються.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Petruk V. Multispectral Methods and Means of Water Pollution Monitoring by Using Macrophytes for Bioindication/ V. Petruk, S. Kvaternyuk, O. Bondarchuk et al. // Water Security. Editors: O. Mitryasova, C. Staddon. – Mykolaiv: PMBSNU – Bristol: UWE, 2016. – P.131-141.
2. Petruk V. The optical diagnostics of parameters of biological tissues of human intact skin in near-infrared range / V. Petruk, S. Kvaternyuk, B. Bolyuh et al. // Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 100313C (September 28, 2016). – P. 100313C-1–100313C-7.
3. Petruk V. G. Spectrophotometric Method for Differentiation of Human Skin Melanoma. II. Diagnostic Characteristics. / V. G. Petruk, A. P. Ivanov, S. M. Kvaternyuk, V. V. Barun // Journal of Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol. 83, Issue 2. – P. 261–270.
4. Petruk V. G. Spectrophotometric Method for Differentiation of Human Skin Melanoma. I. Optical Diffuse Reflection Coefficient. / V. G. Petruk, A. P. Ivanov, S. M. Kvaternyuk, V. V. Barun // Journal of Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol. 83, Issue 1. – P. 85–92.
5. Petruk R. V. Multispectral television monitoring of contamination of water objects by using macrophyte-based bioindication / R. V. Petruk, V. D. Pohrebennyk, S. M. Kvaternyuk et al. // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM2016 Conference Proceedings, June 28 – July 6, 2016, Book 5, Vol. 2. – P. 597–602.
6. Martsenyuk V. Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton / V. Martsenyuk, V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk et al. // 2016 16th International

Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016), Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea. – P. 988–993.

7. Мультиспектральний вимірювальний контроль та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ на основі нечіткої логіки / Г. О. Черноволик, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 147 с.

8. The method of multispectral image processing of phytoplankton for environmental control of water pollution / V. Petruk, S. Kvaternyuk, V. Yasynska, A. Kozachuk, A. Kotyra, R. S. Romaniuk, N. Askarova // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2015. Vol. 9816, 98161N (17 December 2015). – P. 98161N-1–98161N-5; doi: 10.1117/12.2229202.

9. Multispectral televisional measuring control of the ecological state of waterbodies on the characteristics macrophytes / V. Petruk, S. Kvaternyuk, A. Kozachuk, S. Sailarbek, K. Gromaszek // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2015. Vol. 9816, 98161Q (17 December 2015). – P. 98161Q-1–98161Q-4; doi: 10.1117/12.2229343.

10. Methods and means of measuring control and diagnostics of biological tissues in vivo based on measurements of color coordinates and multispectral image / V. Petruk, O. Kvaternyuk, S. Kvaternyuk, O. Mokanyuk, L. Yekenina, W. Wojcik, R. S. Romaniuk, I. Baglan // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2015. Vol. 9816, 98161H (17 December 2015). – P. 98161H-1– 98161H-5; doi:10.1117/12.2229034.

11. The spectral polarimetric control of phytoplankton in photobioreactor of the wastewater treatment / V.G. Petruk, S. M. Kvanternyuk; Y. M. Denysiuk; K. Gromaszek // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2012, Vol. 8698, 86980H. – P. 86980H-1–86980H-4.

12. Research of the spectral diffuse reflectance of melanoma in vivo / V.G. Petruk, S.M. Kvaternyuk, D.B. Bolyuh, Y.M. Denysiuk, A. Kotyra // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2012, Vol. 8698, 86980F. – P. 86980F-1–86980F-6.

***Кватернюк Сергій Михайлович*** – докторант, кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. E-mail: [serg.kvaternuk@gmail.com](mailto:serg.kvaternuk@gmail.com)

***Kvaternyuk Sergei Mikhailovich*** – doctoral student, Ph.D., Associate Professor of the Department of Ecology and ecological safety, Vinnytsia National Technical University, e-mail: [serg.kvaternuk@gmail.com](mailto:serg.kvaternuk@gmail.com).