

УДК 681.785; 681.518.5; 504.064.3

С. М. КВАТЕРНЮК

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНОСУ ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ДЛЯ ЗАДАЧ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ

*Вінницький національний технічний університет,
21010, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна,
тел.: +380 (432) 59-84-43, E-mail: serg.kvaternuk@gmail.com*

Анотація. Здійснено математичне моделювання спектральних характеристик багатошарових неоднорідних біологічних середовищ для задач мультиспектрального вимірювального контролю та діагностики біофізичних та структурних параметрів. Розв'язано пряму оптичну задачу розрахунку спектральних характеристик одного макроскопічно однорідного шару середовища з відомими параметрами.

Ключові слова: мультиспектральний контроль, засіб контролю, телевізійний вимірювальний контроль, неоднорідне середовище, математичне моделювання.

Аннотация. Проведено математическое моделирование спектральных характеристик многослойных неоднородных биологических сред для задач мультиспектрального измерительного контроля и диагностики биофизических и структурных параметров. Решена прямая оптическая задача расчета спектральных характеристик одного макроскопически однородного слоя среды с известными параметрами.

Ключевые слова: мультиспектральный контроль, средства контроля, телевизионный измерительный контроль, неоднородная среда, математическое моделирование.

Abstract. The authors modeled spectral characteristics of the multi-layer inhomogeneous biological media for measurement tasks multispectral control and diagnostic of biophysical and structural parameters. We have been solved direct optical problem calculating the spectral characteristics of a macroscopically homogeneous medium layer with known parameters.

Keywords: multispectral control, vehicle control, measurement control TV, heterogeneous environment, mathematical modeling.

ВСТУП

Методи та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ можуть використовуватись для ряду прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції. При цьому використовується n-вимірне мультиспектральне подання інформації для кожного пікселя масиву цифрових зображень отриманих ПЗЗ-камерою. 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 [1—3]. 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 відрізнятись. 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.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи є вдосконалення математичних моделей для розрахунку оптичних характеристик окремих шарів неоднорідних біологічних середовищ, що дозволить вирішити пряму задачу визначення коефіцієнтів відбиття при відомих параметрах середовища. При цьому з'являється можливість, при відомих спектральних характеристиках освітлювачів, фільтрів та ПЗЗ-камери визначити коефіцієнти яскравості на характеристичних довжинах хвиль.

Кожен із шарів неоднорідних біологічних середовищ у даному випадку вважається макроскопічно однорідним з відовими та незмінними параметрами тканини-основи, а також з визначеними концентраціями хромофорів, оптичні характеристики яких відомі та добре вивчені [4, 5, 7].

Проведемо математичне моделювання переносу випромінювання на прикладі шару дерми з поверхневим сплетінням судин інтактної (неушкодженої) шкіри людини. Методика розрахунку є незмінною для інших типів неоднорідних біологічних середовищ при відповідній підстановці параметрів поглинання та розсіювання тканини-основи, а також оптичних характеристик основних хромофорів.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНОСУ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Провівши нелінійну апроксимацію оптичних параметрів знекровленої дерми за даними [1—7] в Matchcad 13.0 отримаємо такі вирази для спектральних характеристик показників поглинання і розсіювання та фактору анізотропії знекровленої дерми:

$$\mu_{a,bd}(\lambda) = 1,282 + 98,977 \cdot \exp(-(\lambda - 154) / 66,2), \quad (1)$$

$$\mu_{s,bd}(\lambda) = 2,802 \cdot 10^6 \lambda^{-1,5} + 4,945 \cdot 10^{11} \lambda^{-4}, \quad (2)$$

$$g_{bd}(\lambda) = 0,621 + 2,868 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda. \quad (3)$$

Графіки спектральних характеристик показників поглинання $\mu_{a,bd}(\lambda)$, розсіювання $\mu_{s,bd}(\lambda)$ та фактору анізотропії $g_{bd}(\lambda)$ знекровленої дерми обчислені за формулами (1)—(3) наведено на рис. 1.

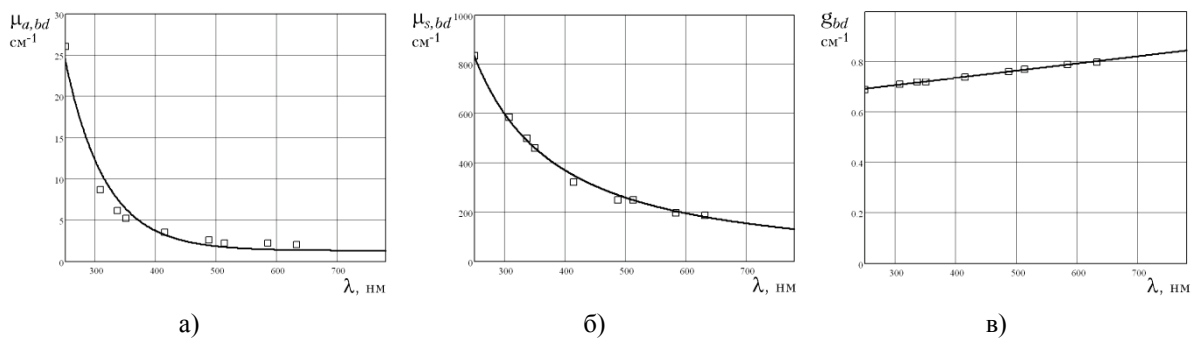


Рис. 1. Спектральні характеристики показників поглинання (а), розсіювання (б) та фактору анізотропії (в) знекровленої дерми

Показники поглинання, розсіювання та фактор анізотропії шарів дерми в залежності від вмісту крові:

$$\mu_{a3-7}(\lambda) = f_{blood} \mu_{a,blood}(\lambda) + (1 - f_{blood}) \mu_{a,bd}(\lambda), \quad (4)$$

$$\mu_{s3-7}(\lambda) = f_{blood} \mu_{s,blood}(\lambda) + (1 - f_{blood}) \mu_{s,bd}(\lambda), \quad (5)$$

$$g_{3-7}(\lambda) = f_{blood} g_{blood}(\lambda) + (1 - f_{blood}) g_{bd}(\lambda), \quad (6)$$

де f_{blood} — об'ємний вміст крові в дермі, $\mu_{a,blood}(\lambda)$, $\mu_{s,blood}(\lambda)$, $g_{blood}(\lambda)$ — показники поглинання, розсіювання та фактор анізотропії крові в капілярах та судинах шарів дерми,

$\mu_{a,bd}(\lambda)$, $\mu_{s,bd}(\lambda)$, $g_{bd}(\lambda)$ — показники поглинання, розсіювання та фактор знекровленої дерми.

В свою чергу показники поглинання та розсіювання крові залежать від її біомедичних параметрів [1—3, 6]:

$$\mu_{a,blood}(\lambda) = (p_{нк} \mu_a^{HbO_2}(\lambda) + (1 - p_{нк}) \mu_a^{Hb}(\lambda)) C, \quad (7)$$

$$\mu_{s,blood}(\lambda) = 440,72 H (1 - H) (1,4 - H) \left(\frac{685}{\lambda} \right). \quad (8)$$

де λ — довжина хвилі в нм; $\mu_{a,blood}(\lambda)$, $\mu_{s,blood}(\lambda)$ — показники поглинання і розсіювання крові в $см^{-1}$; $p_{нк}$ — ступінь насичення крові киснем, що визначається як відношення вмісту оксигемоглобіну до загального гемоглобіну (в нормі у капілярній крові шарів дерми 96—99 %); C — концентрація гемоглобіну в моль/л (в нормі 2,306 ммоль/л); $\mu_a^{Hb}(\lambda)$, $\mu_a^{HbO_2}(\lambda)$ — показники поглинання гемоглобіну і оксигемоглобіну в $см^{-1} \cdot моль^{-1}$; H — гематокрит, об'ємний відсоток еритроцитів у цільній крові (в нормі у чоловіків 39—49 %, у жінок 36—45 %);

Фактор анізотропії для крові приймаємо рівним $g_{blood}(\lambda) = 0,995$.

Спектральні характеристики показників поглинання оксигемоглобіну і гемоглобіну вводимо в математичну модель використовуючи лінійну інтерполяцію в Matchcad 13.0 на основі таблиці експериментальних даних вимірювань. Графіки спектральних характеристик показників поглинання оксигемоглобіну і гемоглобіну наведено на рис. 2.

$$\mu_a^{Hb}(\lambda) \text{ в } см^{-1} \cdot моль^{-1}$$

Спектральні характеристики показників поглинання і розсіювання крові обчислюємо за формулами (7)—(8). На рис. 3 представлено графіки спектральних характеристик показників поглинання і розсіювання крові розраховані при насиченості киснем $p_{нк} = 0,98$ та концентрації гемоглобіну $C = 2,306$ ммоль/л.

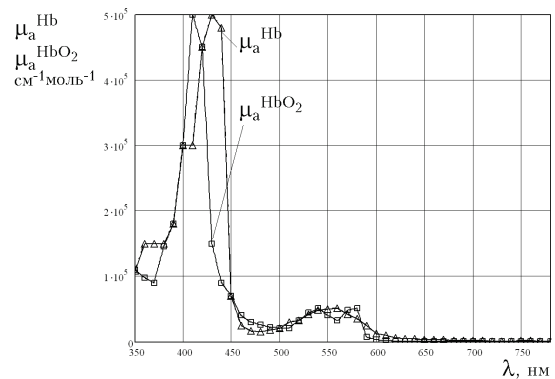
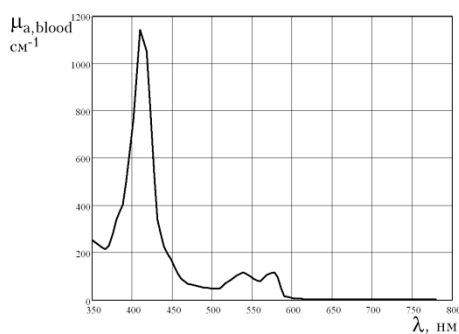
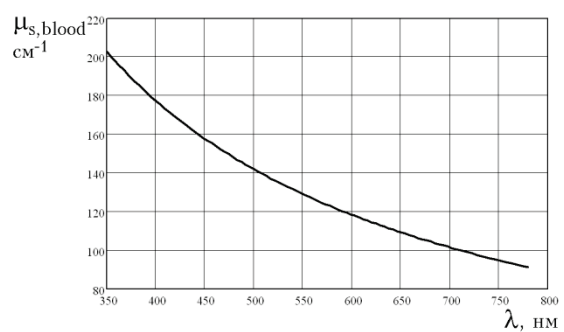


Рис. 2. Спектральні характеристики показників поглинання оксигемоглобіну $\mu_a^{HbO_2}(\lambda)$ і гемоглобіну $\mu_a^{Hb}(\lambda)$



а)



б)

Рис. 3. Спектральні характеристики показників поглинання (а), розсіювання (б) крові при $p_{нк} = 0,98$, $C = 2,306$ ммоль/л

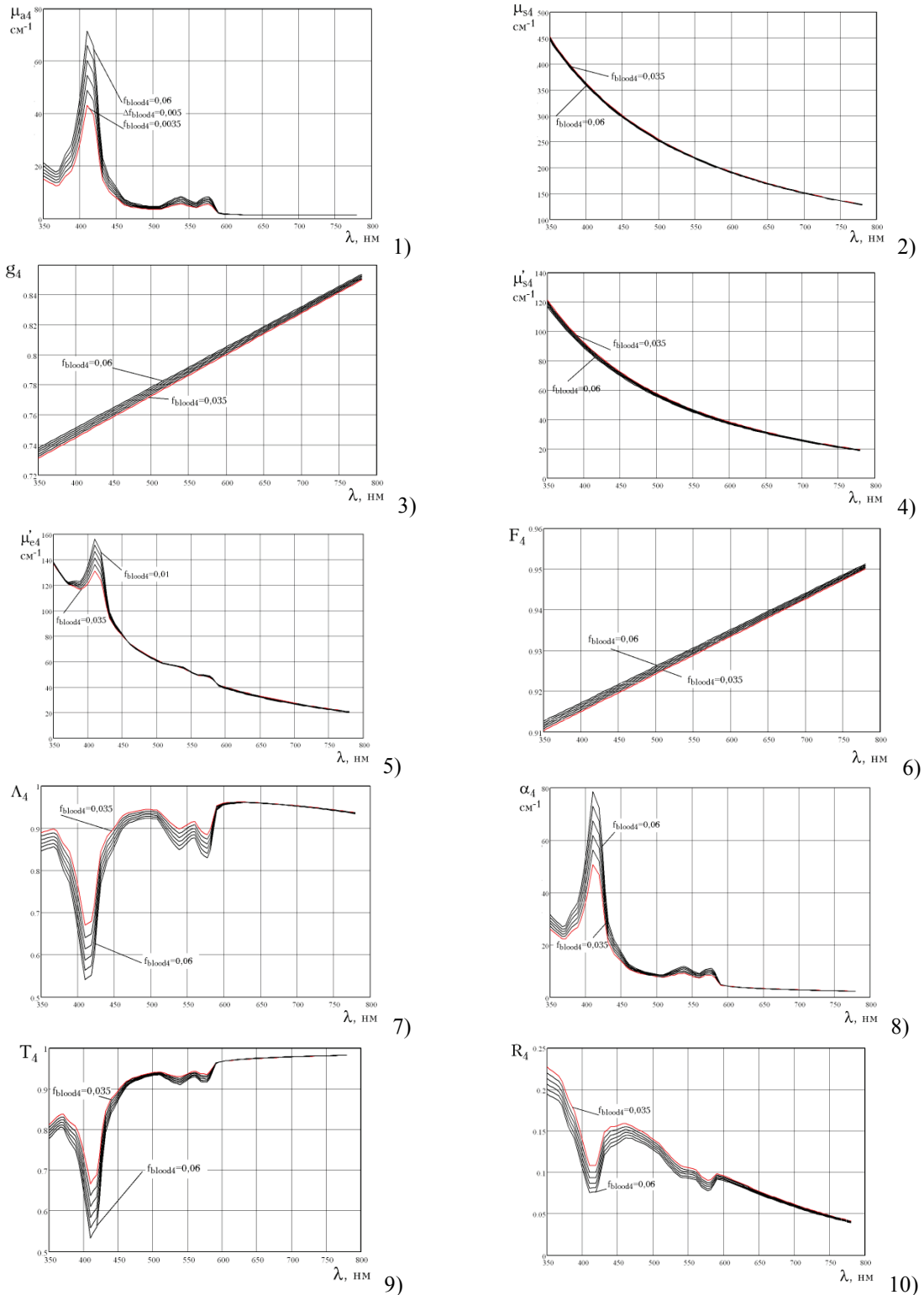


Рис. 4. Спектральні характеристики показників поглинання (1) та розсіювання (2), фактору анізотропії (3), ефективних показників розсіювання (4) та ослаблення (5), частки світла, розсіяного в передню півсферу (6), ймовірності виживання фотона (7), показника послаблення в МКН (8), коефіцієнта направленої пропускання (9), коефіцієнта дифузного відбивання (10) шару дерми з поверхневим сплетінням судин

Розраховуємо показник поглинання $\mu_{a4}(\lambda)$, розсіювання $\mu_{s4}(\lambda)$ та фактор анізотропії $g_4(\lambda)$ шару дерми з поверхневим сплетінням судин, на основі яких розраховуємо ефективні показники

розсіювання μ'_{s4} та ослаблення μ'_{e4} шарів дерми за методикою [4, 5]. Далі розраховуємо спектральні залежності частки світла, розсіяного в передню півсферу $F_4(\lambda)$, ймовірності виживання фотона $\Lambda_4(\lambda)$, показника послаблення в МКН $\alpha_4(\lambda)$, коефіцієнта направлено пропускання $T_4(\lambda)$ та коефіцієнта дифузного відбивання $R_{d4}(\lambda)$ для шарів дерми. На рис. 4 представлено графіки розрахованих спектральних характеристик для шару дерми з поверхневим сплетінням судин, товщиною 80 мкм при об'ємному вмісті $f_{blood4} = 0,035 \dots 0,06$.

На основі отриманих спектральних характеристик з'являється можливість вибору оптимальних довжин хвиль для вимірювального контролю параметрів або діагностування певних типів патологій у одному з шарів неоднорідного біологічного середовища. При цьому встановлено, який вплив має зміна концентрацій основних хромофорів одного з шарів біологічного середовища в межах фізіологічно нормальних меж на його спектральні характеристики, а також на загальний коефіцієнт дифузного відбиття.

ВИСНОВКИ

Для підвищення достовірності контролю параметрів неоднорідних біологічних середовищ або точності діагностування патологічних змін у біотканинах необхідно вдосконалювати методи, що дозволяють визначити біофізичні і структурні параметри кожного з шарів середовища з малими похибками [8—10]. При цьому вказані параметри шарів неоднорідних біологічних середовищ визначаються опосередковано на основі вимірювань коефіцієнту яскравості на певних характеристичних довжинах хвиль. При використанні ПЗЗ-камери, системи освітлювачів та фільтрів формуються мультиспектральні зображення неоднорідних біологічних середовищ, які показують просторовий розподіл у них основних хромофорів, а також зміну основних біофізичних та структурних параметрів, які введені у математичну модель [11—14]. При цьому спочатку необхідно розрахувати спектральні характеристики неоднорідного біологічного середовища на основі відомих параметрів, тобто розв'язати пряму задачу. Після цього, на основі множини відомих розв'язків прямої задачі будуються регресійні характеристики, що дозволяють вирішити обернену задачу, тобто визначити біофізичні і структурні параметри середовища за відомими оптичними характеристиками, зокрема, коефіцієнти яскравості, отриманими на певних характеристичних довжинах хвиль.

У даній роботі вдосконалена математична модель переносу випромінювання для одному із шарів багатшарового неоднорідного біологічного середовища. При цьому вважалось, що в межах шару біофізичні та структурні параметри залишаються незмінними, тобто шар є макроскопічно однорідним. Математичне моделювання проведено на прикладі шару дерми з поверхневим сплетінням судин інтактною (неушкодженою) шкіри людини. Розраховані оптичні характеристики шару: показники поглинання та розсіювання, фактор анізотропії, ефективні показники розсіювання та ослаблення, частка світла, розсіяного в передню півсферу, ймовірність виживання фотона, показник послаблення в МКН, коефіцієнт направлено пропускання, коефіцієнт дифузного відбивання, які дозволяють в подальшому визначити оптичні характеристики всього неоднорідного багатшарового середовища, яке розділене на ряд макроскопічно однорідних шарів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Van Gemert M. J. C. Skin optics / M. J. C. Van Gemert, S. L. Jacques, H. J. C. M. Sterenborg, W. M. Star // IEEE Trans. Biomed. Eng. — 1989. — Vol. 36, No. 12. — P. 1146—1154.
2. Bashkatov A. N. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: a review / A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. V. Tuchin // Journal of Innovative Optical Health Sciences. — 2011. — Vol. 4, No. 1. — P. 9—38.
3. Саватеева Е. В., Карабутов А. А., Панченко В. Я. Лазерная оптоакустическая спектроскопия биотканей // Сб. трудов ИПЛИТ РАН. Лазеры в биомедицине. 2005. С. 183—187.
4. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканей / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2015. — № 3. — С. 50—56.
5. Моделювання спектральних характеристик шару епідермісу біотканини шкіри як об'єкту біомедицинської діагностики / В. Г. Петрук, О. Є. Кватернюк, Ю. С. Любчак та ін. // Вісник ХНУ. Серія : Технічні науки. — 2015. — № 2. — С. 218—222.
6. Пушкарева А. Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани : учеб. пос. / А. Е. Пушкарева. — СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. — 103 с.
7. Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в каждом покрове /

- В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, и др. // Проблемы оптической физики и биофотоники : матер. 12-й Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. — Саратов : Новый ветер, 2009. — 234 с. : ил. — С. 69—78.
8. Абрамович М. Д. Вивчення глибинної структури когерентної складової і некогерентного фону багатократно розсіяного світлового поля при широкій варіації структурних і біофізичних параметрів біотканини / М. Д. Абрамович, С. К. Дік, С. М. Кватернюк, В. Г. Петрук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2016. — № 6. — С. 90—95.
 9. Развитие оптических методов диагностики биологических тканей по рассеянному излучению. I. Спектры отражения / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк // Вестник Фонда фундаментальных исследований. — 2010. — № 3. — С. 90—98.
 10. Развитие оптических методов диагностики биологических тканей по рассеянному излучению. II. Поляризационная пространственно-разрешающая спектроскопия. / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк // Вестник Фонда фундаментальных исследований. — 2010. — № 4. — С. 79—89.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.

SPYSOK LITERATURY

1. Van Gemert M. J. C. Skin optics / M. J. C. Van Gemert, S. L. Acques, H. J. C. M. Sterenborg, W. M. Star // IEEE Trans. Biomed. Eng. — 1989. — Vol. 36, No. 12. — P. 1146—1154.
2. Bashkatov A. N. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: a review / A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. V. Tuchin // Journal of Innovative Optical Health Sciences. — 2011. — Vol. 4, No. 1. — P. 9—38.
3. Savateeva E. V., Karabutov A. A., Panchenko V. YA. Lazernaya optoakustycheskaya spektroskopiya byotkaney // Sb. trudov YPLYT RAN. Lazery v byomedytsyne. 2005. S. 183—187.
4. Matematychnе modelyuvannya vplyvu parametriv okremykh shariv na spektralni kharakterystyky neodnoridnykh biotkanyn / V. H. Petruk, S. M. Kvaternyuk, O. YE. Kvaternyuk ta in. // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. — 2015. — № 3. — S. 50—56.
5. Modelyuvannya spektralnykh kharakterystyk sharu epidermisu biotkanyny shkiry yak obyektu biomedychnoyi diahnostryky/ V. H. Petruk, O. YE. Kvaternyuk, YU. S. Lyubchak ta in. // Visnyk KHNU. Seriya: Tekhnichni nauky. — 2015. — № 2. — S. 218—222.
6. Pushkareva A. E. Metody matematycheskoho modelyrovannya v optyke byotkany : ucheb. pos. / A. E. Pushkareva. — SPb : SPbHU YTMO, 2008. — 103 s.
7. Modelyrovanye vlyyanyya épydermysa na perenos sveta y tepla v kozhnom pokrove / V. V. Barun, A. P. Yvanov, V. H. Petruk, y dr. // Problemy optycheskoy fyzyky y byofotonyky : mater. 12-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy shkoly po optyke, lazernoy fyzyke y byofotonyke. — Saratov : Novyy veter, 2009. — 234 s. : yl. — S. 69—78.
8. Abramovych M. D. Vyvchennya hlybynnoyi struktury koherentnoyi skladovoyi i nekoherentnoho fonu bahatokратно rozsiyanoho svitlovoho polya pry shyrokiy variatsiyi struktornykh i biofizychnykh parametriv biotkanyny / M. D. Abramovych, S. K. Dik, S. M. Kvaternyuk, V. H. Petruk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. — 2016. — № 6. — S. 90—95.
9. Razvytye optycheskykh metodov dyahnostryky byolohycheskykh tkaney po rasseyanomu yzluchenyyu. I. Spektry otrazhenyya / V. V. Barun, A. P. Yvanov, V. H. Petruk, S. M. Kvaternyuk // Vestnyk Fonda fundamental nykh yssledovanyy. — 2010. — № 3. — S. 90—98.
10. Razvytye optycheskykh metodov dyahnostryky byolohycheskykh tkaney po rasseyanomu

- yzluchenyu. II. Polyaryzatsyonnaya prostranstvenno-razreshayushchaya spektroskopyya. / V. V. Barun, A. P. Yvanov, V. H. Petruk, S. M. Kvaternyuk // Vestnyk Fonda fundamental nykh yssledovanyu. — 2010. — № 4. — S. 79—89.
11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.

Надійшла до редакції 14.12.2016 р.

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