УДК 681.518.3: 535.243.2

В.Г. ПЕТРУК, О.Є. КВАТЕРНЮК, Ю.С. ЛЮБЧАК, С.М. КВАТЕРНЮК
Вінницький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРУ ЕПІДЕРМІСУ БІОТКАНИНИ ШКІРИ ЯК ОБ'ЄКТУ БІОМЕДИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Здійснено аналіз особливостей біотканин як об'єктів медичної діагностики методами та засобами колориметрії. Удосконалено математичну модель переносу випромінювання у приповерхневих шарах епідермісу. Досліджено вплив, який має зміна концентрації меланіну шкіри з різною пігментацією на її спектральні характеристики.

Ключові слова: математична модель, спектральні характеристики, біотканина, шкіра.

V.G. PETRUK, O.E. KVATERNYUK, Y.S. LYUBCHAK, S.M. KVATERNYUK
Vinnytsia National Technical University

MODELLING OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF BIOLOGICAL TISSUES SKIN LAYER OF THE EPIDERMIS AS OBJECTS OF BIOMEDICAL DIAGNOSTICS

Abstract. The aim is mathematical modelling spectral characteristics of the layer of the epidermis, which will determine the impact of changes in the concentration of melanin in the spectral characteristics of biological tissue, and, consequently, the accuracy of diagnosis of the state of biological tissue, methods and means of colorimetry. The model takes into account the presence of biological tissue particles of different shapes and sizes, and the impact on the optical properties of biological pigments in different segments of biological tissues.

The researchers analyzed the characteristics of biological tissues as objects of medical diagnostic methods and means of colorimetry. In this paper, we have improved mathematical model of radiative transfer in the surface layers of the epidermis. We have investigated the effect of changing the concentration of melanin skin with varying degrees of pigmentation on its spectral characteristics.

Keywords: mathematical model, spectral characteristics, biological tissues, skin.

Вступ

З оптичної точки зору біологічні тканини шкіри людини є неоднорідними поглинаючими середовищами з яскраво вираженими розсіювальними властивостями. Взаємодія світла з такими середовищами має складний характер. Процеси розсіювання і поглинання світла визначають, з одного боку, глибину проникнення світла в біотканину, а з іншого боку, впливають на спектр розсіяного «назад» випромінювання, аналіз якого є основою оптичних діагностичних методів. Присутність в досліджуваних біологічних середовищах частинок різної форми та розміру, а також вплив на оптичні характеристики різних біологічних пігментів, які можуть бути локалізовані у певних шарах біотканин, ускладнює визначення концентрації певних речовин у біотканині.

Метою роботи є математичне моделювання спектральних характеристик шару епідермісу, що дозволить визначити вплив концентрації меланіну шкіри з різною пігментацією на її спектральні характеристики, а, відповідно, і на діагностику стану біотканини методами та засобами колориметрії.

Особливості біотканин як об'єктів медичної діагностики оптичними методами

Однією з характеристик взаємодії світла з біологічною тканиною є поглинання світла. Значна частина ефектів, пов'язаних із взаємодією світла з біологічною тканиною, зумовлена процесом поглинання світла середовищем. Коефіцієнт поглинання світла у середовищі визначається інтегралом перекриття спектрів зондуючого випромінювання і поглинання хромофорів, що входять до складу біотканини. Абсолютні значення показників поглинання для біотканин шкіри людини лежать в межах 10^{-2}–10^{-4} см$^{-1}$ [1, 2]. Крім поглинання біологічна тканина шкіри характеризується також певним світлорозсіюванням. При цьому переважна більшість біотканин є сильно розсіювальними середовищами. Під розсіюванням світла в середовищі в широкому сенсі слова розуміють зміну напрямку його поширення, яка відбувається або через флуктуації показника заломлення середовища, або через наявність границі поділу середовищ з різними показниками заломлення у випадку багатошарової біологічної структури. Характер розсіювання світла в біотканині (ефективність розсіювання та анізотропія розсіювання) визначається співвідношенням довжини хвилі світла і розміру розсіювальних частинок. У біотканинах розсіювальними частинками є як елементи клітин (мембрани, ядра, органели тощо), так і елементи фіброзної тканини (еластинові і колагенові волокна). Розсіювачі мають широкий спектр розмірів, тому в біотканинах відбуваються різні види розсіювання – від релеївського розсіювання до розсіювання Мі.

Багатократне розсіювання проникаючого у біотканини світла призводить до його об'ємного поширення всередину середовища і в комбінації з поглинанням визначає глибину його проникнення всередину біотканини. Результатом розсіювання світла є також формування потоку розсіяного «назад» випромінювання, який на поверхні шкіри реєструється як дифузно відбите біотканинами шкіри людини світло. Очевидно, що спектральний склад розсіяного «назад» випромінювання також визначається як поглинаючими властивостями середовища, а саме: специфічними спектрами поглинання компонентів, що входять до складу біотканини, так і розсіювальними властивостями середовища, оскільки і коефіцієнт

розсіювання μ_s, і параметр анізотропії g (середнє значення косинуса кута розсіювання) залежать від довжини хвилі зондуючого випромінювання.

Таким чином, оптичні характеристики біотканин (коефіцієнт поглинання μ_a, коефіцієнт розсіювання μ_s, параметр анізотропії розсіяння g, показник заломлення n) несуть важливу інформацію про кількісний вміст і просторовий розподіл різних біологічних компонентів біотканини, що дає потенційні можливості діагностики стану біотканини [1–3].

По суті, епідерміс являє собою порівняно тонку багатошарову клітинну структуру, що містить специфічні пігменти, які захищають дерму від УФ-випромінювання. Меланін є основним хромофором епідермісу, добре поглинає світло як в УФА, так і у видимій і ближній інфрачервоній областях спектру. Насамперед, спектри поглинання меланіну, утвореного в результаті опромінення шкіри світлом УФА і УФВ діапазонів, суттєво відрізняються один від одного: в першому випадку виявляється зменшення поглинання в діапазоні нижче 400 нм на відміну від другого, коли поглинання із зменшенням довжини хвилі монотонно зростає. Більш того, опромінення шкіри людини світлом видимого діапазону призводить до утворення пігменту, відмінного від наведених вище випадків. Спектр характеризується практично лінійною залежністю поглинання в області довжин хвиль понад 600 нм, збільшенням поглинання в області коротких довжин хвиль з максимумом близько 335 нм і різким спадом в області більш коротких довжин хвиль. Область поглинання меланіну розтягнута аж до 1200 нм; для довжин хвиль понад 1200 нм не виявлено суттєвих відмінностей у оптичних властивостях між шкірою людей з різним ступенем пігментації [4].

Крім поглинання біотканина шкіри характеризується значним світлорозсіювання. Причиною розсіювання є неоднорідність показника заломлення в об'ємі біотканини, що відображає її фізичну неоднорідність. При цьому характер розсіювання залежить від співвідношення довжини хвилі випромінювання та розміру розсіювальних частинок (дифракційного параметра розсіювання). У біотканині шкіри є розсіювачі, розміри яких значно менше довжини хвилі зондую чого випромінювання, розсіювачі з розмірами близькими до довжини хвилі і розсіювачі, розміри яких значно перевищують довжину хвилі світла. У результаті, в шкірі мають місце різні види розсіювання: від релеївського розсіювання до розсіювання Мі.

Математичне моделювання трансформації випромінювання у біотканинах шкіри

На межі розділу двох середовищ з різними показниками заломлення (n), таких як «повітря-шкіра» чи між різними шарами біотканини шкіри, відбувається відбивання та заломлення світла. В залежності від характеристик поверхні біотканини шкіри має місце дзеркальне чи дифузне відбивання. Дзеркальне відбивання відбувається у випадку, коли нерівності поверхні суттєво менші довжини хвилі зондуючого випромінювання. У цьому випадку нормалі падаючого та відбитого пучків випромінювання, а також нормаль до відбиваючої поверхні лежать у одній площині, а кут падіння дорівнює куту відбивання. Більш поширеним є дифузне відбивання, коли величина нерівностей відбиваючої поверхні порівнянна, або більша ніж довжина хвилі випромінювання. Оскільки у поверхні шкіри завжди існують певні дефекти та нерівності дзеркальна компонента відбитого випромінювання незначна у порівнянні із частиною зондуючого випромінювання, яка відбивається та розсіюється проникнувши у приповерхневий шар. Оскільки дзеркальна компонента малоінформативна для медичної діагностики її прагнуть позбавитись з використанням певної геометрії «освітлювач-спостерігач» чи за допомогою поляризаційних фільтрів.

Для розрахунку використовувалася модель шкіри, що являє собою багатошарову структуру. Основним компонентом епідермісу, що поглинає світло, є меланін. Його спектральний показник поглинання (в см$^{-1}$) можна апроксимувати у вигляді [4]:

$$\mu_{a,mel}(\lambda) = 6,6 \cdot 10^{11} \lambda^{-3,33}. \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі в нм.

Об'ємна концентрація f_{mel} меланіну (частка об'єму меланіну в одиничному об'ємі епідермісу) може варіюватися від декількох одиниць до десятків % для людей зі світлою і темною шкірою, відповідно. Графік спектральної характеристики показника поглинання меланіну наведено на рис. 1.

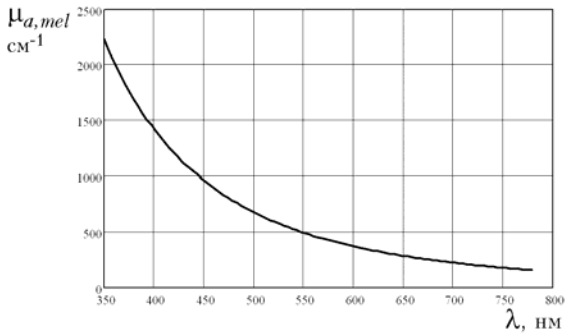

Рис. 1. Спектральна характеристика показника поглинання меланіну

Вважаємо, що решта частини епідермісу – «тканина-основа» або «знекровлена тканина» («bloodless tissue» в англомовній літературі), у якої показник розсіювання $\mu_{s,bt}(\lambda)$ (в см$^{-1}$) [4]

$$\mu_{s,bt}(\lambda) = 2\cdot 10^5 \lambda^{-1,5} + 2\cdot 10^{12}\lambda^{-4}, \quad (2)$$

показник поглинання $\mu_{a,bt}(\lambda)$ (в см$^{-1}$) [5]

$$\mu_{a,bt}(\lambda) = 0,244 + 85,4\cdot \exp\left(-(\lambda - 154)/66,2\right), \quad (3)$$

середній косинус $g_{bt}(\lambda)$ індикатриси розсіювання $p(\theta,\lambda)$ [5]

$$g_{bt}(\lambda) = 0,62 + 0,0029\lambda, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі в нм.

Графіки спектральних характеристик показників поглинання $\mu_{a\,bt}(\lambda)$, розсіювання $\mu_{s\,bt}(\lambda)$ та фактору анізотропії $g_{bt}(\lambda)$ тканини-основи епідермісу обчислені за формулами (2)–(4) наведено на рис. 2.

Розраховуємо оптичні характеристики шару епідермісу з об'ємною концентрацією меланіну f_{mel}, а також ефективний показник розсіювання епідермісу, виходячи з показника розсіювання $\mu_{s,bt}$ та середнього косинусу індикатриси розсіювання $g_{bt}(\lambda)$ тканини-основи епідермісу:

$$\mu'_{s2} = \mu_{s,bt}\left(1 - g_{bt}(\lambda)\right). \quad (5)$$

Відтак, показник поглинання епідермісу з об'ємною концентрацією меланіну f_{mel} буде

$$\mu_{a2}(\lambda) = \mu_{a,mel}(\lambda) f_{mel} + \mu_{a,bt}(\lambda)(1 - f_{mel}). \quad (6)$$

Звідси, ефективний показник послаблення епідермісу розраховується так:

$$\mu'_{e2} = \mu_{a2} + \mu'_{s2}. \quad (7)$$

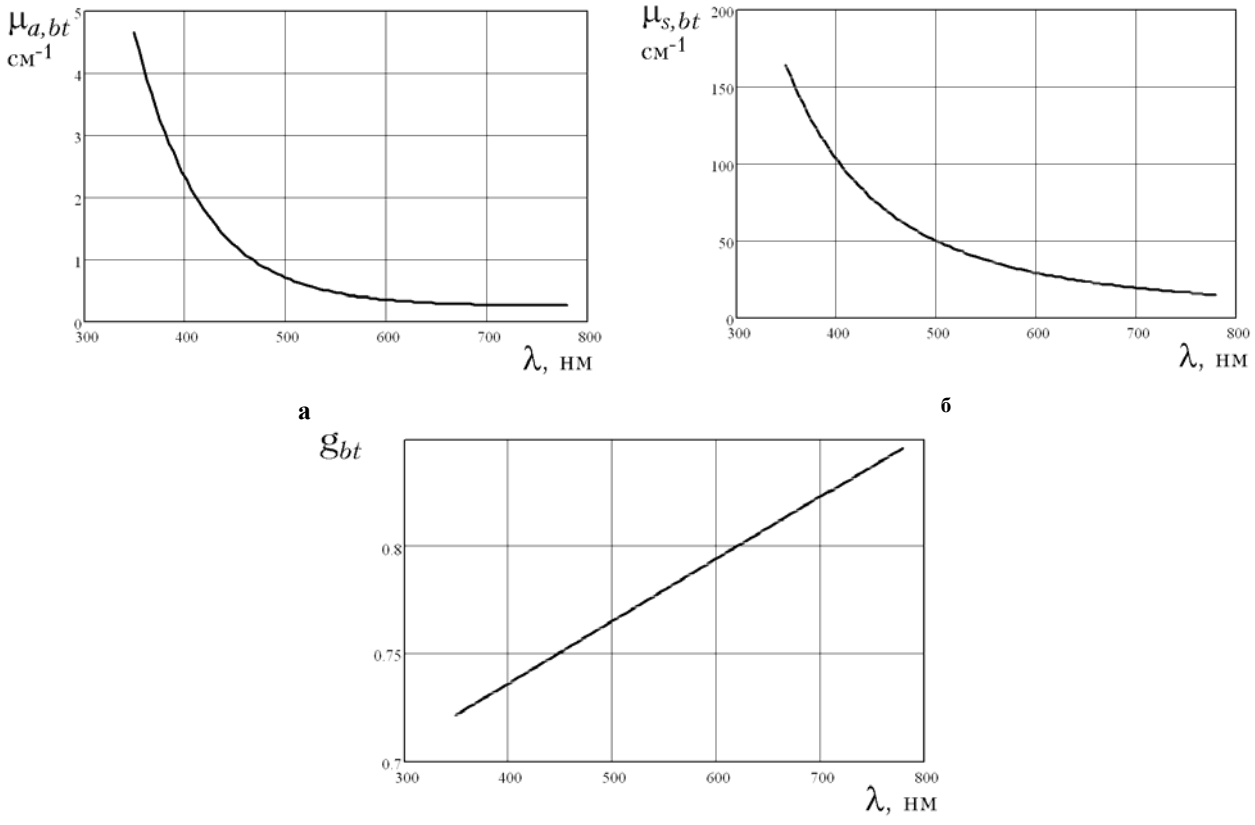

Рис. 2. Спектральні характеристики показників поглинання (а), розсіювання (б) та фактору анізотропії (в) тканини-основи епідермісу

На рис. 3 представлено графіки спектральних характеристик моделі епідермісу розраховані при зміні об'ємної концентрації меланіну від 0,5 до 3 % за формулами (2)–(7) у порівнянні з експериментальними даними вимірювань з роботи [6] для шкіри з різною пігментацією (див. табл. 1).

Таблиця 1

Оптичні параметри біотканини епідермісу шкіри з різною пігментацією

λ , нм	μ_{a2} , см$^{-1}$			μ_{s2} , см$^{-1}$	g_2
	lightly	**medium**	**highly**		
350,00	9,99	30,16	69,80	210,40	0,702
400,00	6,77	20,20	46,67	156,30	0,712
450,00	4,41	13,50	31,52	121,60	0,728
500,00	2,58	9,77	21,82	93,01	0,745
550,00	1,63	6,85	16,13	74,70	0,759
600,00	1,47	5,22	12,35	63,76	0,774
650,00	1,20	3,68	9,15	55,48	0,787
700,00	1,06	3,07	7,11	54,66	0,804

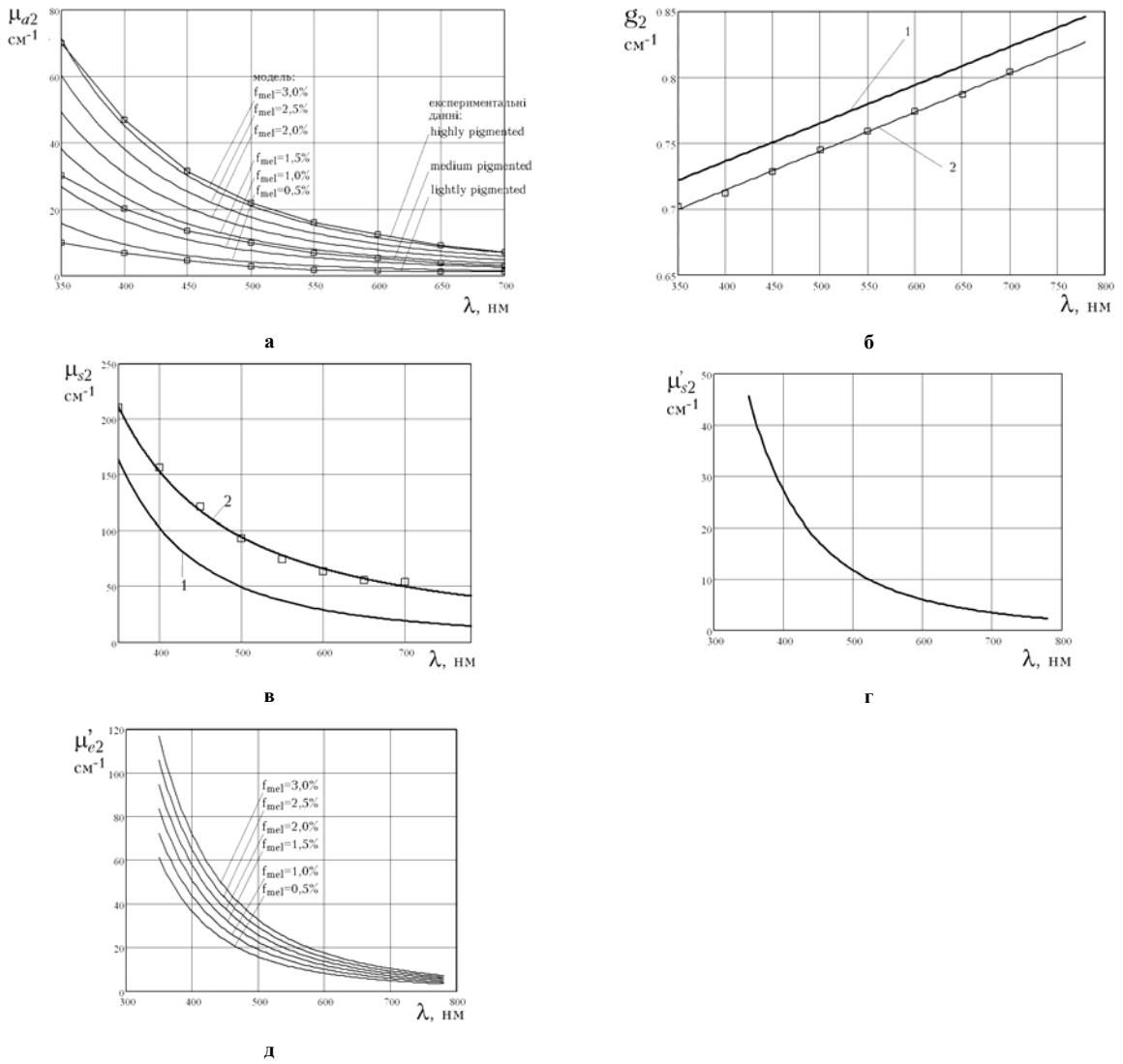

Рис. 3. Спектральні характеристики параметрів епідермісу при різних об'ємних концентраціях меланіну (2) у порівнянні з експериментальними даними (1): а) – показника поглинання, б) – фактор анізотропії епідермісу, в) – показника розсіювання, г) – ефективний показник розсіювання, д) – ефективний показник послаблення

Результати моделювання спектральних характеристик параметрів епідермісу дозволяють врахувати об'ємні концентрації меланіну для шкіри з різною пігментацією, що важливо для забезпечення високої точності оптичних засобів діагностики патологічних уражень шкіри в прикладних задачах онкології, судово-медичної експертизи та патанатомії з використанням методів спектрофотометрії, цифрової колориметрії з вимірюванням координат кольору, а також мультиспектральної діагностики.

Висновки

Проаналізовано особливості біотканин, як об'єктів медичної діагностики методами та засобами колориметрії. Удосконалено математичну модель переносу випромінювання у приповерхневих шарах епідермісу. При цьому встановлено, який вплив має зміна концентрації меланіну шкіри з різною

пігментацією на її спектральні характеристики, а, відповідно, і на діагностику стану біотканини оптичними методами.

Література

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 Сарат. ун-та, 1998. – 384 с.

3. Королевич А. Н. Особенности спектров диффузионного отражения и пропускания нормальных и опухолевых тканей / А. Н. Королевич, Е. В. Олейник, Я. И. Севковский, А. Я. Хайруллина // Журнал прикладной спектроскопии. – 1993. – Т. 58, № 5–6. – С. 555–559.

4. Барун В. В. Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в кожном покрове / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, И. В. Васильковский // Проблемы оптической физики и биофотоники : материалы 12-й Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. – Саратов : Изд-во «Новый ветер», 2009. – С. 69–78.

5. Van Gemert M. J. C., Acques S. L. , Sterenborg H. J. C. M., Star W. M. Skin optics. IEEE Trans. Biomed. Eng. 1989. Vol. 36, No. 12. P. 1146–1154.

6. Bashkatov A. N., Genina E. A., Tuchin V. V. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: a review. Journal of Innovative Optical Health Sciences. 2011. Vol. 4, No. 1. P. 9–38.

References

1. Tuchin V. V. Issledovanie biotkaney metodami svetorasseyaniya / V. V. Tuchin // Uspehi fiz. nauk. – 1997. – V. 167. – №5. – P. 517-539.

2. Tuchin V. V. Lazeryi i volokonnaya optika v biomeditsinskih issledovaniyah / V. V. Tuchin. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1998. – 384 p.

3. Korolevich A. N. Osobennosti spektrov diffuzionnogo otrazheniya i propuskaniya normalnyih i opuholevyih tkaney / A. N. Korolevich, E. V. Oleynik, Ya. I. Sevkovskiy, A. Ya. Hayrullina // Zhurnal prikladnoy spektroskopii. –1993. – T.58, №5–6. – P. 555-559.

4. Barun V. V. Modelirovanie vliyaniya epidermisa na perenos sveta i tepla v kozhnom pokrove / V. V. Barun, A. P. Ivanov, V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, I. V. Vasilkovskiy // Problemyi opticheskoy fiziki i biofotoniki. Materialyi 12-oy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy shkolyi po optike, lazernoy fizike i biofotonike. – Saratov: Izd-vo «Novyiy veter», 2009. – 234 s.: il. – P.69-78.

5. 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.

6. 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.

Рецензія/Peer review : 17.3.2015 р. Надрукована/Printed :15.4.2015 р.
Рецензент: стаття рецензована редакційною колегією