

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. О. Черноволик, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк

**МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ
КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ
НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ
НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 681.7:535.243

ББК 26.222

Ч-86

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 25 червня 2015 р.).

Рецензенти:

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор

В. А. Порєв, доктор технічних наук, професор

В. Г. Кур'ята, доктор біологічних наук, професор

Черноволик, Г. О.

Ч-86 Мультиспектральний вимірювальний контроль та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ на основі нечіткої логіки : монографія / Г. О. Черноволик, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 140 с.
ISBN 978-966-641-648-6

В монографії досліджено можливості підвищення швидкодії та вірогідності мультиспектрального контролю концентрацій частинок неоднорідних біологічних середовищ. Розвинуто відомі та розроблено нові математичні моделі трансформації випромінювання неоднорідними біологічними середовищами на основі перенесення випромінювання. Запропоновано мультиспектральний метод контролю параметрів неоднорідних біологічних середовищ та створено засіб контролю, що дозволяє ефективно із значною швидкістю здійснювати процес вимірювань і контролю параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

УДК 681.7:535.243

ББК 26.222

ISBN 978-966-641-648-6

© Г. Черноволик, В. Петрук, С. Кватернюк, 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ.....	7
1.1 Аналіз рівняння перенесення випромінювання та методів його розв'язання.....	8
1.1.1 Аналіз методу інтегральної сфери.....	11
1.1.2 Аналіз методу дифузного відбиття.....	12
1.2 Класифікація неоднорідних біологічних середовищ як об'єктів вимірювального контролю та діагностики.....	13
1.3 Аналіз оптичних методів контролю та діагностики параметрів неоднорідних біологічних середовищ	25
1.4 Аналіз мультиспектральних методів контролю та діагностування оптичних параметрів неоднорідних біологічних середовищ.....	32
1.5 Аналіз сучасних засобів підтримки прийняття діагностичних рішень в діагностиці та контролі параметрів неоднорідних біологічних середовищ	38
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ КОНТРОЛЮ.....	43
2.1 Математичні моделі перенесення випромінювання неоднорідними біологічними середовищами	43
2.2 Математичні моделі спектральних характеристик відбиття і пропускання випромінювання у багат шарових біологічних середовищах.....	51
2.3 Математична модель перетворення випромінювання оптичним первинним перетворювачем	57
РОЗДІЛ 3 ЗАСІБ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА АНАЛІЗ ЙОГО МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	61
3.1 Автоматизований мультиспектральний контроль параметрів неоднорідних біологічних середовищ	61

3.2 Аналіз метрологічних параметрів засобів вимірювального контролю та методика їх нормування	68
3.3 Дослідження метрологічних характеристик вимірювального каналу засобу автоматизованого контролю	70
3.4 Аналіз похибок вимірювань	77
РОЗДІЛ 4 ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ ТА ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ ДІАГНОСТИЧНИХ РІШЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ	
4.1 Дослідження параметрів приповерхневого шару ушкоджених біотканин	84
4.2 Експертна система підтримки прийняття діагностичного рішення	95
4.3 Оцінювання вірогідності контролю	102
4.4 Методика мультиспектральної діагностики ризиків малігнізації при онкологічних захворюваннях шкіри за допомогою розроблених методів та засобів	104
4.5 Статистична обробка результатів мультиспектральних вимірювань та оцінювання метрологічних параметрів діагностування та контролю	113
ВИСНОВКИ	122
ЛІТЕРАТУРА	125

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
ВОХ – волоконно-оптичний хвилевід
ЕС – експертна система
ІВС – інформаційно-вимірювальна система
ІЧ – інфрачервоний
КДВ – коефіцієнт дифузного відбиття
МІС – метод інтегрувальної сфери
МКН – малокутове наближення
ОВ – оптичне волокно
ОК – об'єкт контролю
ОПП – оптичний первинний перетворювач
ПЗЗ – пристрій з зарядовим зв'язком
ПК – персональний комп'ютер
ПТФЕ – політетрафторетилен
СЧВ – системний червоний вовчак
ТПВ – теорія переносу випромінювання
УФ – ультрафіолетовий

ВСТУП

Сучасні методи і засоби контролю неоднорідних середовищ, зокрема біотканин, не у повній мірі задовольняють жорсткі вимоги користувачів, зокрема науковців. В першу чергу, це стосується їх надмірної вартості, масивності, недостатньої швидкодії, чутливості і точності, необхідної вірогідності контролю. Актуальність роботи викликана наявною проблемою недостатньої об'єктивності та низького рівня вірогідності контролю стану біотканин, що зумовлює необхідність розроблення неруйнівного методу контролю, оскільки традиційні методики вимагають значних витрат часу, є в певній мірі, суб'єктивними, руйнівними і мають вірогідність контролю, яка в недостатній мірі забезпечує об'єктивність діагностики.

В роботі запропоновано автоматизований метод контролю стану біотканин за їх спектрофотометричними параметрами для підтримки прийняття діагностичного рішення, суть якого полягає у неінвазійному вимірюванні спектральних коефіцієнтів дифузного відбиття об'єктів контролю і порівнянні їх з нормою та використанні отриманих результатів як вхідного параметра експертної системи, що, на відміну від аналогів, дозволяє підвищити швидкодію та вірогідність контролю для підтримки прийняття діагностичного рішення. Також удосконалено математичні моделі перетворення випромінювання в сферичному первинному вимірювальному перетворювачі, в основі яких лежить спосіб Тейлора (робочий отвір на його стінці), що враховують оптико-геометричні параметри інтегровальної сфери, тіньові ефекти, дзеркальну та дифузну компоненти відбиття, а відтак, дозволяють збільшити чутливість і точність вимірів інформаційних параметрів та вірогідність контролю. Крім того, дістали подальший розвиток математичні моделі перетворення випромінювання приповерхневим шаром біотканин, які, на відміну від відомих, враховують особливості структури патологічних біотканин, а тому більш вірогідно відображають процеси трансформації випромінювання приповерхневим прошарком біотканин. Отримано аналітичні залежності статичних метрологічних характеристик розробленого засобу автоматизованого контролю, що дозволило оцінити точність вимірювань та вірогідність контролю. Розроблено засіб для неінвазійного автоматизованого контролю оптичних характеристик, в якому проводиться одночасне вимірювання спектрів дифузного відбиття нормальної та патологічної ділянок біотканин, що дозволяє збільшити швидкодію процесу контролю та зменшити значення методичної складової систематичної похибки вимірювання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

На сьогодні для засобів та методів, за допомогою яких проводяться дослідження біотканин, однією з найважливіших властивостей є можливість проведення неруйнівного контролю.

Серед методів, за допомогою яких можна ефективно проводити такий контроль, особливе місце займають оптичні. Вони мають й інші переваги, а саме: індиферентність оптичного сигналу до електромагнітних завад, потенційна багатоканальність променів і найбільша у природі швидкість передачі інформації. Вони дозволяють досить точно визначати кількісні і якісні показники дослідного зразка [1–3].

У зв'язку з цим, розробка та впровадження в практику засобів автоматизованого контролю є актуальною, має велике значення для розвитку, зокрема, медичної діагностики. При цьому традиційні методи контролю та вимірювань оптичних параметрів не у повній мірі задовольняють вимоги сучасної спектроскопії світлорозсіювальних об'єктів, а тому потребують подальших наукових пошуків, нових розробок, суттєвого вдосконалення, автоматизації та інтелектуалізації існуючих контрольних-вимірювальних засобів. Вирішення цих проблем є метою і концептуальною основою, а також входить до задач нашої роботи, що базується, з одного боку, на теорії перенесення та розсіяння випромінювання, а з другого боку, на фундаментальних принципах контрольних-вимірювальної техніки і метрології.

Методи визначення оптичних параметрів біотканин можна поділити на прямі та непрямі [4]. До прямих методів належать методи, в основі яких лежать закон Бугера, фазова функція однократного розсіяння для тонких зразків або ефективна глибина проникнення світла для об'ємних середовищ. Параметрами, які вимірюються, є відбиття або пропускання та індикатриса розсіювання для тонких зразків або освітленість всередині об'ємного середовища. Перевагами цих методів є простота аналітичних виразів, які використовують при обробці даних. Недоліки прямих методів пов'язані з вимогою виконання умов експерименту, які відповідають моделі: однократність розсіювання для тонких зразків, виключення впливу поляризації світла та заломлення світла на межі двох фаз тощо. Для об'ємних середовищ з багатократним розсіюванням детектор, який реєструє освітленість, повинен бути розташований на певній відстані від джерела світла та границі середовищ. Непрямі визначення потребують коректних математичних моделей, які точно пов'язують інформаційний параметр з факторами впливу тощо.

1.1 Аналіз рівняння перенесення випромінювання та методів його розв'язання

При розробленні засобів, які призначені для дослідження оптичних параметрів біотканин, слід враховувати, що біологічна тканина є неоднорідним світлорозсіювальним середовищем, яке швидко змінюється в часі і майже не пропускає світло [5]. При цьому практично будь-яка біотканина має багат шарову структуру, а окремі прошарки можуть мати різні оптичні властивості, що змінюються в залежності від особливостей біотканин, залежать від часу, хвороби тощо.

Оптичні задачі в області дослідження біотканин можна поділити на фотометричні та спектроскопічні [6]. До фотометричних належать задачі, що пов'язані з теорією та методами вимірювання енергії оптичних випромінювань при їх розповсюдженні, поглинанні та розсіюванні. До області спектроскопії біологічних об'єктів відносять задачі з визначення параметрів, які характеризують структуру, будову або стан досліджуваного об'єкта.

Розв'язання цих задач базується на теорії перенесення випромінювання [3, 4]. При цьому виділяють пряму та зворотну задачі теорії перенесення випромінювання.

Пряма задача теорії перенесення випромінювання: відомі оптичні властивості та структура біологічного об'єкта, а також умови його освітлення. Потрібно визначити структуру світлового поля в довільній точці об'єкта.

Зворотна задача теорії перенесення випромінювання: задані умови освітлення та розподіл світлового поля в біологічному середовищі. Потрібно визначити оптичні характеристики біологічної тканини.

Іноді необхідно розв'язати зворотну задачу теорії перенесення випромінювання за умов багатократного розсіювання. В основу розв'язання цієї задачі покладено рівняння перетворення випромінювання [7, 8, 9]

$$dI(l) = -(m_\alpha + m_\sigma)I_0(l)dl + \frac{\sigma dl}{4\pi} \int_{4\pi} x(\gamma')I(l')d\omega' + I'_0, \quad (1.1)$$

або

$$\frac{dI(l)}{d\tau} = -I_0(l) + \frac{\Lambda}{4\pi} \int_{4\pi} x(\gamma')I(l')d\omega' + I'_0, \quad (1.2)$$

де I_0 – інтенсивність випромінювання, яке падає на об'єкт; $I(l)$ – інтенсивність випромінювання, яке пройшло крізь об'єкт; $I'_0(l)$ – інтенсивність власного випромінювання елемента об'єму dl ; l – напрямок поширення променів; $\varepsilon = m_\alpha + m_\sigma$ – показник згасання (послаблен-

ня); m_α – показник поглинання; α – коефіцієнт поглинання; m_σ – показник розсіяння; σ – коефіцієнт розсіяння; $x(\gamma')$ – індикатриса розсіяння, тобто відносний розподіл по кутах γ' світла, розсіяного елементарним об'ємом dl ; $\Lambda = \frac{m_\alpha}{\varepsilon}$ – ймовірність виживання фотона; $d\omega'$ – тілесний кут стороннього джерела освітлення об'єму dl ; $d\tau = \varepsilon \cdot dl$ – оптична товщина середовища.

Другий член у правій частині рівнянь (1.1), (1.2) називають функцією джерела та позначають через Q . Якщо $Q = 0$, то рівняння (1.1), (1.2) перетворюються в звичайний закон Бугера у диференціальній формі

$$\frac{dI(l)}{d\tau} = -I_0(l) + I_0'(l). \quad (1.3)$$

Це випадок однорідного або квазіоднорідного (нерозсіювального) середовища. Проте, як відомо, природа процесу розсіяння в неоднорідному середовищі вимагає застосування статистичних параметрів, адитивних некогерентним пучкам. Такими характеристиками, що враховують і енергетичні та поляризаційні властивості пучків, є елементи вектора-параметра Стокса [10]. Тоді повне рівняння перенесення у вектор-параметричній формі, що об'єднує задачі когерентної і некогерентної частин взаємного впливу центрів розсіяння, а також закон збереження і стан поляризації випромінювання, матиме зручний для використання вигляд

$$\frac{d\vec{S}_i}{d\tau} = \vec{S}_i + \frac{\Lambda}{4\pi} \int_{4\pi} P_{ij} \vec{S}_j d\omega' + \vec{S}_i^0, \quad (1.4)$$

де $\vec{S} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{pmatrix}$ – чотиривимірний вектор-параметр Стокса: \vec{S}_i, \vec{S}_j – тран-

сформованого і опромінювального пучків відповідно. При цьому $S_1 = I$; $S_2 = I p \cos \Psi$; $S_3 = I p \sin \Psi$; $S_4 = I q$, де I – інтенсивність світлового пучка, тобто модуль вектора Пойнтінга; p – ступінь його поляризації; Ψ – кут між напрямком переважаючої поляризації і довільно вибраною площиною референції; q – ступінь еліптичності поляризованого пучка; P_{ij} – 16-типараметрична матриця розсіяння, що містить всю доступну оптичним методам інформацію про феноменологічні параметри даного середовища (показники поглинання, розсіяння, індикатрису і т. п.).

У випадку ізотропного (неполяризованого) світла $S_2=S_3=S_4=0$ і сферичної індикатриси розсіяння $p_{11} = f(\theta) = 1$ рівняння (1.4) набуває вигляду (1.1), (1.2).

Основна задача теорії розсіяння випромінювання зводиться до спільного розв'язання рівняння перенесення і рівняння променистої рівноваги [11]. При цьому перше визначає зміну інтенсивності випромінювання в середовищі вздовж напрямку розповсюдження променів, а друге пов'язує між собою кількість енергії, що випромінюється елементарним об'ємом, з кількістю поглинутої ним енергії. Отже, при умові сферичної індикатриси $f(\theta) = 1$ матимемо:

$$\left. \begin{aligned} \cos\theta \frac{dI(\tau, \theta)}{d\tau} &= -I(\tau, \theta) + I(\tau); \\ I(\tau) &= \frac{\Lambda}{2} \int_0^\pi I(\tau, \theta') \sin\theta' d\theta' + I_0(\tau). \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Перше рівняння із цього виразу можна спрощено представити рівнянням Шварцшильда

$$\frac{dI}{dl} = -\alpha I - I', \quad (1.6)$$

де $d\tau = \alpha dl$; α – коефіцієнт поглинання; $A = \frac{I'}{\alpha}$ – функція джерела випромінювання або коефіцієнт випромінювання, тоді

$$\frac{dI}{d\tau} = A - I \quad (1.7)$$

і формальним розв'язком цього рівняння є

$$I(l) = I(0) \exp\left\{-\int_0^l \alpha(dl') dl'\right\} + \int_0^l A(l') \exp\left\{-\int_0^l \alpha(dl'') dl''\right\} dl'. \quad (1.8)$$

Рівняння (1.1)–(1.8) доводять, що зміна поляризаційних, енергетичних, геометричних та інших характеристик променів, що поширюються крізь середовище, визначаються їх послабленням внаслідок поглинання і розсіяння (перший член у правій частині (1.1)–(1.4) і збільшенням, завдяки розсіяному світлу сторонніх джерел (сусідніх неоднорідностей середовища), що надходить до його елементарного об'єму з різних сторін (другий і третій члени (1.1)–(1.4)). Вони є інтег-

ро-диференційними рівняннями перенесення, за допомогою яких при відповідних граничних умовах здійснюється розв'язання більшості теоретичних задач, пов'язаних з поширенням випромінювання в квазіоднорідних, неоднорідних і нестационарних середовищах. Проте ретельне і повне розв'язання таких рівнянь практично неможливе. Тому розвиваються саме наближені методи розв'язань, достатньо гнучкі для застосування до будь-яких практичних задач [11]. Такі методи розв'язання рівняння перенесення випромінювання поділяються на дві групи: теоретичні (непрямі) і експериментальні (прямі).

Найбільш поширеними серед теоретичних методів розв'язування: метод послідовних наближень; метод усереднення інтенсивності за напрямками; метод заміни рівняння перенесення випромінювання системою диференціальних рівнянь; метод за принципом інваріантності Амбарцумяна; асимптотичний метод; методи статистичного моделювання; числові методи та ін.

1.1.1 Аналіз методу інтегральної сфери

Метод інтегральної сфери (МІС) [12] широко застосовують під час вимірюваннях в багатьох галузях науки і техніки. Він полягає у використанні принципу Сумпнера [13]: «Якщо джерело випромінювання розташоване у центрі порожнинної кулі з нанесеним всередині шаром дифузно-розсіювальної речовини, то променистий потік, відбитий будь-якою частиною сферичної поверхні, рівномірно розподіляється на всі її ділянки, тобто інтегрується.» Вперше інтегральну сферу як фотометр було використано Ульбріхтом [14]. Метод інтегральної сфери реалізується двома способами:

– спосіб Тейлора [15], коли об'єкт вимірювання (дослідний зразок) встановлений в отворі на стінці сфери навпроти отвору, через який падає зондуєчий пучок променів;

– спосіб Рвачова–Сахновського [16], коли зразок розташований у центрі порожнини сфери, що дозволяє визначати абсолютні коефіцієнти відбиття і пропускання зразка з довільною індикатрисою розсіювання.

Метод інтегральної сфери застосовується у двох варіантах:

– заміщення, коли на місце падіння пучка поперемінно встановлюється або зразковий засіб або об'єкт вимірювального контролю (одноканальна схема);

– порівняння, коли і об'єкт контролю і зразок присутні одночасно (двоканальна схема).

Якщо встановити під пучок дослідний зразок у касеті із світлонепроникним дном, то він відіб'є на стінки сфери потік $\Phi_0 R$. Стінки сфери, у свою чергу, відіб'ють потік $\Phi_0 R \rho$, який повернеться на стін-

ки і багаторазово відіб'ється від них. Так всередині інтегрувальної сфери завдяки багатократному розсіянню виникає рівномірна просторова освітленість (опроміненість) E

$$E = \frac{\Phi_0 R}{S} + \frac{\Phi_0 R \rho}{S} + \frac{\Phi_0 R \rho^2}{S} + \dots = \frac{\Phi_0 R}{S} \cdot \frac{1}{1 - \rho}, \quad (1.10)$$

де S – площа внутрішньої поверхні сфери. Тоді коефіцієнт відбиття R зразка визначається за виразом

$$R = \rho \frac{\Phi_R}{\Phi_0} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1.11)$$

де ρ – коефіцієнт відбиття еталонної речовини, яким є матеріал внутрішнього покриття сфери; N_1 , N_2 – покази реєструючого пристрою для зразка і вірця відповідно. Аналогічно вимірюється і коефіцієнт пропускання T зразка, тільки при знятому з кювети світлонепроникному дні. Тоді

$$T = \rho \frac{\Phi_{R+T} - \Phi_R}{\Phi_0} = \frac{N_3 - N_1}{N_2}. \quad (1.12)$$

Коефіцієнт поглинання α речовиною зразка визначають із закону збереження променистої енергії

$$\alpha = 1 - (R + T). \quad (1.13)$$

За МІС також можна прямо виміряти індикатрису розсіяння, альbedo відбиття та багато інших важливих у спектроскопічному експерименті оптичних характеристик світлорозсіювальних середовищ.

1.1.2 Аналіз методу дифузного відбиття

Метод дифузного відбиття [17] завдяки простоті співвідношень і зручності контролю параметрів відбиття і пропускання шару об'єкта контролю заданої товщини ℓ дозволяє досліджувати оптичні властивості світлорозсіювальних середовищ за спектрами відбиття. Особливо широко використовується вираз, що називається формулою Кубелки-Мунка-Гуревича

$$f(R_\infty) \equiv \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} = \frac{\alpha_0}{\sigma_0} \simeq \frac{2m_\alpha}{m_\sigma}, \quad (1.14)$$

де R_∞ – коефіцієнт дифузного відбиття від шару нескінченної товщини, коли $L=0$, що легко визначається експериментально; α_0 і σ_0 – деякі константи поглинання і розсіяння шару одиничної товщини. При цьому, вимірявши R_∞ (для випадку нормального падіння випромінювання), можна перейти до констант заломлення n і поглинання χ речовини середовища відповідно до виразу

$$R_\infty = \frac{(n-1)^2 + \chi^2}{(n+1)^2 + \chi^2}. \quad (1.15)$$

Для випадку з направленим освітленням зразка часто застосовують таке співвідношення

$$-\ln\left(\frac{R_\infty - R_\ell}{T_\ell}\right) = a + b\ell, \quad (1.16)$$

де R_ℓ і T_ℓ – коефіцієнти відбиття і пропускання шару заданої товщини ℓ ;

$$a = 4\sqrt{\frac{q\varepsilon}{m_\sigma}}; \quad b = \sqrt{\frac{\varepsilon m_\sigma}{q}}, \quad (1.17)$$

де q – параметр Розенберга, який для сферичної індикатрис ($f(\theta)=1$) становить $q=1/3$, а для $f(\theta)=1+\cos\theta$ становить $q=1/2$, а для індикатрис більш складних форм (профілів) має інші значення.

Потрібно відзначити, що функція $f(R_\infty) = \frac{(1-R_\infty)^2}{R_\infty}$ в широкому діапазоні ℓ майже повністю збігається з кривою показника поглинання

$$m_\alpha = \frac{(1-R_\infty)^2}{4R_\infty} \cdot \frac{m_\sigma}{4q}. \quad (1.18)$$

Проте цей метод має певні обмеження, пов'язані з умовами квазі-дифузності та відхиленнями від ізотропності освітлення.

1.2 Класифікація неоднорідних біологічних середовищ як об'єктів вимірювального контролю та діагностики

При побудові інформаційно-вимірювальних систем з використанням вище розглянутих методів одне з вирішальних значень мають ха-

рактики самого об'єкта вимірювання. Від них залежать принципи побудови засобу контролю, його параметри, вибір первинного вимірювального перетворювача, методика проведення експерименту, режим роботи тощо. Тому доцільно розглянути як класифікуються об'єкти саме спектрофотометричних вимірювань та визначити їх місце і роль в методології контролю. Для більш детального розуміння наведено класифікацію об'єктів спектрофотометричних вимірювань [18] з феноменологічної точки зору, що представлена на рис. 1.1.

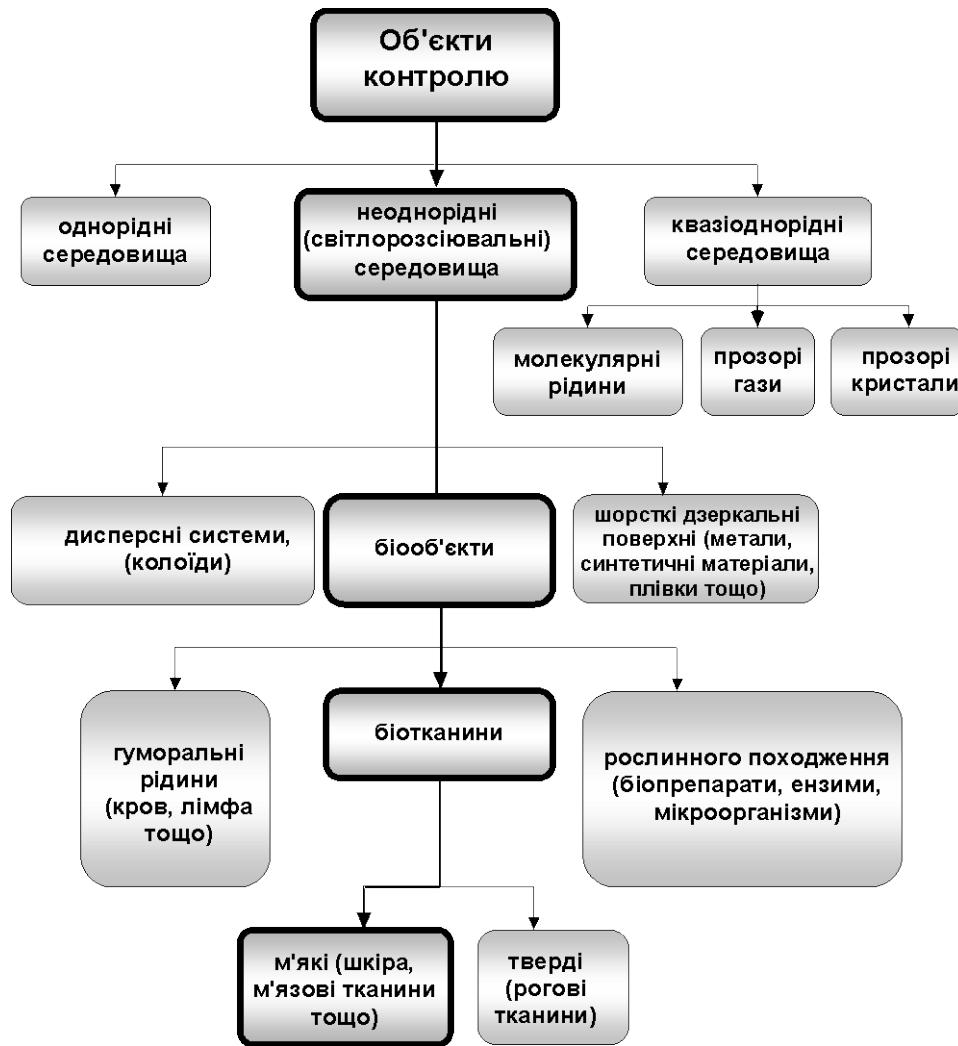


Рисунок 1.1 – Класифікація неоднорідних біологічних середовищ як об'єктів вимірювального контролю та діагностики

За оптичною густиною чи мутністю такі об'єкти розділяються на однорідні, в яких комплексний показник заломлення сталий по всьому об'єму середовища, неоднорідні чи світлорозсіювальні об'єкти, де названий показник не сталий, та квазіоднорідні, тобто майже однорідні, які є прозорими, але не є однорідними. Однорідні об'єкти контролю є досить умовною групою більше ідеалізованою і уявною, ніж реальною.

існуючою, тому що будь-який об'єкт вимірювань може мати оптичні збурення, флуктуації і таке інше.

Як для однорідних, так і для квазіоднорідних середовищ поширене використання методів ТПВ без врахування розсіювальних ефектів (рефрактометрії, фотометрії, кулонометрії і т.п.), а це, в свою чергу, призводить до методичних похибок при визначенні абсолютних значень показників. Тому такі значення, виміряні методами ТПВ, не допустимо використовувати для подальших розрахунків оптичних характеристик і показників, а лише для якісного порівняльного аналізу [20, 21, 22]. Особливим та найпоширенішим в природі класом об'єктів вимірювань є неоднорідні (світлорозсіювальні) середовища. Неоднорідними називаються двофазні або n -фазні системи, у яких частинки однієї фази розподілені всередині об'єму іншої фази і можуть мати видиму або невидиму межу поділу між ними. До них відносяться всі дисперсні системи: колоїди, біооб'єкти, шорсткі та дзеркальні поверхні. Серед них можна проводити широку класифікацію, але зупинимось всього на трьох класах таких об'єктів, до яких можливо віднести всі неоднорідні середовища. Молекулярні світлорозсіювальні середовища та колоїди відносяться до дисперсних систем. Окрім біооб'єктів є ще інший великий клас неоднорідних об'єктів – це тверді тіла з дзеркальною чи шорсткою поверхнею. До них відносяться, в основному, речовини неорганічного походження – різні метали та сплави, напівпровідники, синтетичні матеріали та тонкі плівки, текстиль і тому подібні. Потрібно зауважити, що розвиток методів та ІВС, в основному, проводився через дослідження названих об'єктів. Тому вони розвинені досить добре. Але традиційно оптичні характеристики таких об'єктів розглядалися без врахування їх специфіки як сильно світлорозсіювальних середовищ за класичним законом Бугера–Ламберта–Бера. Проте такі методичні підходи є невиправданими в практиці вимірювань, де необхідно враховувати кооперативні, дифракційні, інтерференційні, поляризаційні та інші ефекти. Це стосується, в першу чергу, наукових досліджень, медичної діагностики, екологічного моніторингу тощо [20, 23, 25].

До об'єктів біологічного походження відносяться, в основному, органічні речовини тваринного та рослинного походження, які, в свою чергу, можна теж умовно розділити на три групи. До них відносяться зразки: гуморальні, тобто життєзабезпечуючі рідини; біотканини та препарати рослинного походження. Існуючі методи їх досліджень – спектроскопія видимого та близьких до нього УФ і ІЧ діапазонів спектру, дозволяє одержувати характеристичні спектри життєво важливих компонентів – білків, амінокислот, гемоглобіну та інших.

Оскільки ці середовища є яскраво неоднорідними (мутними), то для них характерні: мала ймовірність виживання кванта, значний показник питомого поглинання, не різко виражені спектральні піки, неоднорідність оптичних характеристик по об'єму, складність структури та інші.

Все це спонукає до пошуку відповідних методів і методик їх досліджень, контролю, вимірювань та діагностики. У свою чергу, живі тканини поділяються на м'які і тверді. Перші з них – це шкіра та м'язові тканини. Особливість їх полягає в необхідності застосування неінвазійного характеру досліджень, найкращими з яких є методи рефрактометрії, спектрофотометрії, еліпсометрії, що побудовані на принципах дифузного відбиття, Стокс-поляриметрії, абсорбційної спектроскопії.

Об'єктом для спектрального аналізу, а, відповідно, і спектрофотометричних вимірів, може бути зразок будь-якого походження. Серед великого різноманіття розглянутих світлорозсіювальних об'єктів біотканини займають особливе місце. Це зумовлено необхідністю вивчення, дослідження та діагностики цих вкрай важливих середовищ, що пов'язані з життям і здоров'ям людини і несуть безпосередню інформацію про її стан. Біотканини мають складну молекулярну структуру (будову) і є неоднорідними. Тому для них найбільш ефективно може бути застосований увесь апарат методів і засобів оптики розсіяння та спектрофотометрії. Тут особливу цінність набувають як поверхневі властивості біотканин, так і об'ємні (внутрішні) зміни [24, 26].

Внутрішні стани біотканини можна контролювати на основі вимірювання R_{∞} , припустивши, що пропускаяючої компоненти немає $T = 0$, звідки показник питомого поглинання знаходиться досить легко. Така методика буде коректно працювати тільки, коли інтегрується вся відбита компонента і де ℓ – така товщина прошарку зразка, що реалізуються умови багаторазового розсіяння.

При цьому найбільш фотохромним компонентом живої тканини є гемоглобін та його похідні (білірубін, окси-, деокси- та метгемоглобін). Їх характеристичні смуги поглинання містяться у діапазоні 500–650 нм, а отже, будь-які зміни в гемодинаміці біотканини яскраво проявляються саме в процесі спектрофотометрії з одержанням комплексних спектрів поглинання. Це дозволяє, в свою чергу, ефективно діагностувати значну кількість внутрішніх тканинних патологій.

Поверхневі стани добре піддаються дослідженню за допомогою дифузно-відбиваючої оптики з вимірюванням коефіцієнтів дифузного відбиття у видимому діапазоні довжин хвиль ($R = f(\lambda)$). У цьому випадку ефективно себе проявляє спосіб Тейлора за методом інтегрувальної сфери. Об'єкт вимірювань тут виступає як доповнення внутріш-

ньої порожнини сфери. Доцільне їх сумісне застосування при реалізації зондових неруйнівних досліджень біотканин.

Поверхням біотканин властиві поляризаційні, відбивальні, розсіювальні параметри, що несуть інформацію про різноманітні механічні ушкодження, травми, патології, відхилення від норми, колір шкіри тощо. Особливо ефективно можна здійснювати вимірювання кольороутворення шкіри з допомогою відомих принципів колориметричної теорії RGB (XYZ), коли вдається дослідити термін нанесення пошкодження, домінуючу довжину хвилі, відтінок і т. д. У даному разі дослідний зразок виступає вторинним джерелом випромінювання. У такого роду вимірюваннях потрібно враховувати і люмінесцентні властивості елементарного об'єму зразка, що, з одного боку, характеризує світлопоглинальні властивості гемоглобіну та його похідних і жирового прошарку, а, з другого боку, – суттєво спотворюватиме істинне значення інформаційних параметрів R_∞ та m_α . При цьому поляризаційні властивості ОБ теж набувають важливого інформаційного змісту. Зокрема, добре відомі деполяризаційні властивості біотканин, зумовлених наявністю пор, ворсинок, мікротріщин, гемодинамічних особливостей.

Звідси, живі біотканини виступають як випадково-неоднорідні середовища з яскраво вираженими світлорозсіювальними властивостями, що можна віднести до типово «сірих» об'єктів. У цьому зв'язку в процесі вимірювань добре себе проявляє у якості робочого еталону відбиття як MgO, так і більш сучасний – політетрафторетилен (ПТФЕ) з спектральними коефіцієнтами дифузного відбиття у видимій області довжин хвиль $\rho_\lambda = 0,95\text{--}0,99$ [28, 29].

Отже, біологічні об'єкти контролю є неоднорідними і відносяться до класу світлорозсіювальних середовищ, до яких можливе застосування відповідних законів (закон відбиття, закон Бугера–Ламберта–Бера), методів оптики розсіяння і спектрофотометрії неоднорідних середовищ видимого діапазону, але з обов'язковою умовою детального обґрунтування при використанні їх до цих надто складних і специфічних об'єктів контролю, зокрема, в процесі медичної діагностики.

Біотканини, зокрема, шкіра людини досліджена в публікаціях відносно її складу, структури і оптичних властивостей [30, 35, 37]. Найчастіше використовують багатошарову модель біотканини, коли властивості змінюються уздовж одного напрямку – глибини z . Модель включає три основних шари – роговий, епідерміс і дерму. Їх товщина варіюється в межах 0,01–0,02, 0,04–0,15 і 1–4 мм відповідно. Ці шари позначимо нижче індексами 1, 2 і 3. Дерма, у свою чергу, складається з низки характерних підшарів з різною концентрацією капілярів [33]. Діаметр капілярів може варіюватися від декількох до десятків мкм.

Зрозуміло, що така структура достатньо умовна. Реально між шарами немає ні різких меж, ні чітко виражених відмінностей в показниках заломлення. Нижче для наочного опису відбиття світла від шкіри, візьмемо просту тришарову одновимірну модель шкіри, що складається з рогового шару, епідермісу і макроскопічно однорідної дерми. Цю модель можна розширити на більше число шарів.

Вважаємо, що основою всіх трьох шарів є «знекровлена» тканина або тканина-основа. Вона містить меланін в епідермісі і хаотично розподілені кровоносні судини (капіляри) в дермі. У шкірі є також вода, але для оцінки коефіцієнта дифузного відбиття (КДВ) у видимій і ближній ІЧ областях спектру нею нехтуватимемо. Зафіксуємо товщину (0,02 мм) рогового шару. Як показали подальші розрахунки, він грає незначну роль у відбитті світла шкірою через малу оптичну товщину. Характеристики двох інших шарів варіюються і є предметом діагностики. Меланін визначає колір шкіри. Його об'ємна концентрація f (об'єм меланіну в одиниці об'єму епідермісу) варіюється від одиниць %, для людей з світлою шкірою, до декількох десятків %, для африканців. Об'ємна концентрація капілярів c звичайно складає декілька %. Кров розглядаємо як суміш окси- і деоксигемоглобіну із змінним ступенем оксигенації S (відношення об'єму оксигемоглобіну до об'єму всього гемоглобіну).

Оптичні характеристики шкіри, що описують перенесення випромінювання в середовищі, визначаються через відповідні властивості оптично активних компонент і їх концентрації. Для елементарних об'ємів трьох шарів шкіри маємо:

$$k_1 = k_t; \quad k_2 = fk_m + (1-f)k_t; \quad k_3 = c\alpha k_b + (1-c)k_t; \quad (1.20)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_t; \quad \varepsilon_2 = (1-f)\varepsilon_t; \quad \varepsilon_3 = c\varepsilon_b + (1-c)\varepsilon_t, \quad (1.21)$$

де ε і k – показник поглинання і приведений показник послаблення ($\varepsilon = \varepsilon'(1-g)$); ε' – показник послаблення; g – середній косинус індикутиси розсіяння; $g_{1,2,3} = 0,62 + 0,00029\lambda$, λ в нм [41]); індекси « t » і « b » відносяться відповідно до тканини-основи, меланіну і крові. Поправочний коефіцієнт α враховує локалізоване поглинання світла [43] кровоносними судинами. У свою чергу, показник поглинання крові k_b визначається показниками поглинання окси- (HbO_2) і деоксигемоглобіну

$$k_b = Hf_H \left[Sk_{HbO_2} + (1-S)k_{HbO} \right], \quad (1.22)$$

де H – гематокрит (об'ємна частка еритроцитів в крові); f_H – об'ємна частка гемоглобіну в еритроцитах.

З (1.21) і (1.22) видно, що поглинання кров'ю містить добуток cHf_H , а не ці величини окремо. Тому з оптичних експериментів можна визначити лише вказаний добуток. Нехай $H = 0,4$ і $f_H = 0,25$. На рис.1.2 приведені спектри показників поглинання і ослаблення вказаних оптично активних компонент. З рис.1.2 (крива 5) виходить, що у видимій і ближній ІЧ областях можна з упевненістю нехтувати поглинанням води.

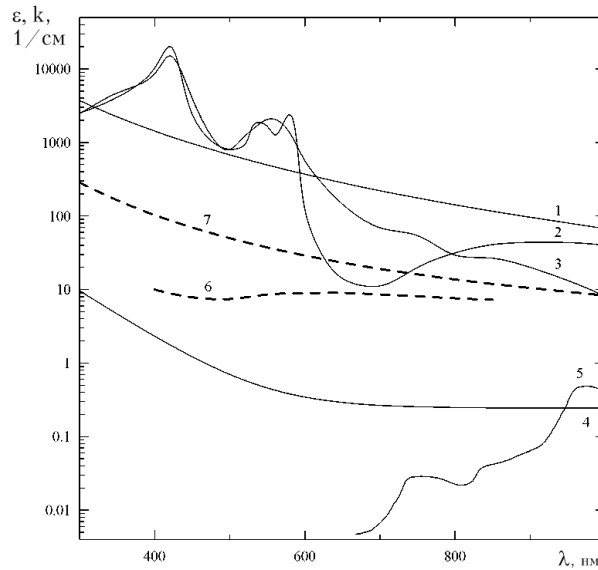


Рисунок 1.2 – Показники поглинання (суцільні криві) і приведені показники ослаблення (штрихові) меланіну (крива 1), окси- (2) і деоксигемоглобіну (3), тканини-основи (4, 7), води (5) і цільної крові (6) залежно від довжини хвилі

Формула (1.20) вводить ефект локалізованого поглинання світла [8 – 10] судинами через поправочний коефіцієнт α . Було показано [8, 10], що α залежить від добутку $k_b D$ середнього діаметра капілярів на показник поглинання крові. Фізично коефіцієнт α означає, що не весь об'єм крові ефективно бере участь в поглинанні світла. Дійсно, якщо, випромінювання повністю поглинеться периферією судини, а його внутрішня частина просто не впливатиме на проходження світла. Це вимагає скоректувати об'ємну частку поглинаючої речовини (крові в нашому випадку), коли вона зосереджена в просторово обмежених областях. У [43] запропонована аналітична формула для коефіцієнта α у разі хаотично розподілених капілярів, яка справедлива в діапазоні значень, типовому для біологічних тканин у видимій і ближній ІЧ областях спектру:

$$\alpha = 2\sqrt{3} \frac{1 - \exp\left[-\pi k_b D (1 - 0,043 k_b D) / (2\sqrt{3})\right]}{\pi k_b D} \quad (1.23)$$

Як видно, завжди виконується нерівність $\leq \alpha 1$. Розрахунки по (1.23) були зіставлені [43] з результатами чисельного інтегрування і моделювання методом Монте-Карло і доведена їх хороша відповідність. З (1.23) випливає, що при $k_b D \gg 1$ має місце звичайне рівномірне поглинання $z = \alpha 1$. Які ж наслідки такого ефекту для задач діагностики, що розглядаються тут? У синьо-зеленій області, де має місце сильне поглинання світла кров'ю, добуток $k D$ порядку 1 і більше, так що показник поглинання елементарного об'єму дерми залежить від D . В принципі, це відкриває нові можливості для визначення D за характеристиками випромінювання, що проходить через тканину. Відзначимо також, що при $\lambda > 600$ нм, через слабе поглинання крові коефіцієнт α практично дорівнює 1 для реальних діаметрів капілярів, так що D не впливає на показник поглинання, а, відповідно, це є випадок рівномірного поглинання.

Розглянемо аналітичний опис спектрального коефіцієнта дифузного відбиття (інформаційного параметра) світла шкірою. Нехай шкіра освітлена направленим пучком. Поширення світла можна схематично представити таким чином. Спочатку поверхня шкіри відбиває деяку частку падаючого потоку з коефіцієнтом відбиття r . Внаслідок незначної оптичної товщини верхніх двох шарів і сильної витягнутості «вперед» їх індикатрис розсіяння, світло, що проходить через поверхню шкіри, падає на три послідовних її шари як направлений пучок. Потім при розсіянні або відбитті випромінювання стає практично дифузним. Мають місце багатократні перевідбиття між шарами. В результаті, деякий світловий потік виходить з поверхні і збирається приймачем – інтегрувальною сферою. Відношення повного потоку, що вийшов, до падаючого є КДВ R шкіри. Розглянута схема припускає, що спектральні значення $R(\lambda)$ залежать від коефіцієнтів пропускання і відбиття направленого і дифузного світла роговим шаром і епідермісом, а також від коефіцієнта відбиття направленого і дифузного світла дермою. Тому нижче наведені формули для коефіцієнтів пропускання і відбиття направленого і дифузного випромінювання відповідними шарами. Величини, що відносяться до дифузного світла, помічені зірочкою (*). Як наголошувалося, роговий шар і епідерміс мають достатньо малу оптичну товщину, тому для опису поширення в них направленого випромінювання використано малокутове наближення теорії перенесення, а дифузного – асимптотичне наближення [44]. З іншого боку, дерма – це оптично товстий шар, для якого добре працює асимптотичне наближення. Відзначимо, що дерма розглядається як напівнескінченне розсіювальне і поглинальне середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред / А. П. Иванов. – Минск : Наука и техника, 1969. – 592 с.
2. Иванов А. П. Исследование параметров рассеивающих сред методами статистической оптики. А. П. Иванов, А. Я. Хайруллина, А. П. Чайковский. – Минск, 1980. – 20 с. (Препринт ИФ АН БССР: № 203).
3. Tuchin V. Handbook of optical biomedical diagnostics / Valery V. Tuchin, editor, p. cm. – (SPIE Press monograph ; v. PM107).
4. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю) / В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 208 с.
5. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы / М. П. Цапенко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
6. Петрук В. Г. Теоретичні основи оптичних методів вимірювань неоднорідних середовищ : монографія. Ч. 1. / В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1997. – 110 с.
7. Бабак В. П. Основы автоматического керування в системах неруйнівного контролю : навч. посібник / В. П. Бабак, В. М. Шпилька. – К. : УМК ВО, 1992. – 204 с.
8. Пилипович В. А. Средства автоматизации, измерений, контроля и управления / В. А. Пилипович, Н. А. Анишкевич. – Мн. : Навука і тэхніка, 1984. – 254 с.
9. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник: в 2-х книгах / А. С. Боровиков, Э. И. Вайнберг, В. И. Горбунов и др. ; под ред. В. В. Клюева. – Кн. 1. – М. : Машиностроение, 1986. – 488 с.
10. Оптико-электронные приборы для научных исследований : учеб. пособие / Л. А. Новицкий и др. – М. : Машиностроение, 1986. – 432 с.
11. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1983. – 456 с.
12. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / С. Чандрасекар – М. : Изд. иностр. лит., 1953. – 432 с.
13. Hulst Van De H. C. Multiple Light Scattering / Van De H. C. Hulst. – New York : Academic Press, 1980. – 739 p.

14. Рвачев В. П. Методы оптики светорассеивающих сред в физике и биологии / В. П. Рвачев. – Минск : Изд-во БГУ, 1978. – 238 с.
15. Рвачев В. П. Основы экспериментальной фотометрии и спектрофотометрии / В. П. Рвачев. – Гомель : ГГУ, 1977. – 116 с.
16. Рвачев В. П. Матричный метод исследования светового поля в светорассеивающей среде / В. П. Рвачев // Распространение света в дисперсной среде. – Мн. : Навука і тэхніка, 1982. – С. 292–310.
17. Рвачев В. П. Моделирование светового режима в светорассеивающей среде и экспериментальное определение матриц переноса / В. П. Рвачев // ЖПС. – 1971. – Т. 15. – С. 519–528.
18. Сахновский М. Ю. О возможностях использования интегрального шарового фотометра в измерениях диффузного отражения по абсолютной методике / М. Ю. Сахновский // Оптика и спектроскопия. – 1987. – Т. 62, вып. 3. – С. 692–697.
19. Сахновский М. Ю. О точности спектрофотометрических измерений на интегральном шаровом фотометре / М. Ю. Сахновский. – Минск, 1981. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ 15.04.81 № 5467.
20. Амбарцумян В. А. Диффузия света через рассеивающую среду большой оптической толщины / В. А. Амбарцумян // ДАН СССР. – Т. 43, вып. 3. – 1944. – С. 106–110.
21. Апресян Л. А. Теория переноса излучения (статистические и волновые аспекты) / Л. А. Апресян, Ю. А. Кравцов. – М. : Наука, 1983. – 216 с.
22. Розенберг Г. В. Физические основы спектроскопии светорассеивающих веществ / Г. В. Розенберг // УФН. – 1967. – Т. 91, вып. 4, – С. 596–608.
23. Розенберг Г. В. Электродинамика статистически неоднородных сред и теория переноса / Г. В. Розенберг // Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. – Мн. : Навука і тэхніка, 1971. – С. 159–170.
24. Розенберг Г. В. Световой режим в глубине рассеивающей среды и спектроскопия диспергированных веществ / Г. В. Розенберг // ДАН СССР. – 1958. – Т. 122, № 2. – С. 211–214.
25. Розенберг Г. В. Оптические свойства толстых слоев однородной рассеивающей среды / Г. В. Розенберг. – Мн. : Изд. АН БССР, 1963. – С. 5–35.

26. Науменко Е. К. Исследование применимости численного метода решения обратной спектроскопической задачи оптики рассеивающих сред / Е. К. Науменко // ЖПС. – 1981. – Т. 35, № 1. – С. 183.
27. Chance B. Optical method / B. Chance // Ann. Rev. Biophys. Biophys. Chem. – 1991. – V. 20. – P. 1–28.
28. Anderson R. R. Optical properties of human skin / R. R. Anderson, J. A. Parrish // The Science of Photomedicine, J. D. Regan and J. A. Parrish (eds.). – New York : Plenum Press, 1982. – P. 147–194.
29. Patterson M. S. Noninvasive measurement of tissue optical properties: current status and future prospects / M. S. Patterson // Comments Mol. Cell. Biophys. – 1995. – V. 8. – P. 387–417.
30. Moseley H. Special Issue on Optical Radiation Technique in Medicine and Biology / H. Moseley // Phys. Med. Biol. – 1997. – V. 24. – P. 759–996.
31. Ozaki Y. Medical application of Raman spectroscopy / Y. Ozaki // Appl. Spectroscopy Reviews. – 1988. – V. 24. – P. 259–312.
32. Tu A. T. Raman Spectroscopy in Biology / A. T. Tu. – New York : John Wiley & Sons Ltd, 1982. – P. 65–96.
33. Duck F. A. Physical Properties of Tissue: A Comprehensive Reference Book / F. A. Duck. – London : Academic, 1990. – 360 p.
34. Лопатин В. В. Численное моделирование процесса распространения и рассеяние света в мутных биологических средах / В. В. Лопатин, А. В. Приезжев, В. В. Федосеев // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 7. – С. 29–41.
35. Гираев К. М. Оптические исследования биотканей: определение показателей поглощения и рассеивания / К. М. Гираев, Н. А. Ашурбеков, О. В. Кобзев // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 3, вып. 21. – С. 48–54.
36. Компьютерная спектрофотометрия в медицинской диагностике / А. А. Елисеев, Ю. П. Морозова, В. А. Козинская [и др.] // Вестник Томского государственного университета. – 2000. – № 269. – С. 113–117.
37. Лаппа А. В. Определение оптических параметров биотканей по дифференциальным характеристикам отраженного света / А. В. Лаппа, И. Е. Шипицин // Физика в биологии и медицине : Вторая Российская конференция: тезисы докл. – Челябинск, 2005. – С. 56.

38. Куртном Г. Принципы и методика измерения в спектроскопии диффузного отражения / Г. Куртном, В. Браун, Г. Герцог // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 85, вып. 2. – С. 365–380.

39. Барун В. В. Оценка вкладов локализованного поглощения света кровеносными сосудами в оптические свойства биологической ткани / В. В. Барун, А. П. Иванов // Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т. 96, № 6. – С. 1019–1024.

40. Анализ оптических методов оценки физиологических свойств кожи / С. В. Павлов, Рами Хамди, П. Ф. Колесник [и др.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 3. – С. 137–141.

41. Методика и прибор для оценки степени эритемы и меланиновой пигментации кожи человека / Ю. П. Синичкин, С. Р. Утц, Л. Е. Долотов [и др.] // Радиотехника. – 1997. – № 4. – С. 77–81.

42. Dolotov L. E. Design and evaluation of a novel portable erythema-melanin-meter / L. E. Dolotov, Yu. P. Sinichkin, V. V. Tuchin, S. R. Utz, G. B. Altshuler, I. V. Yaroslavsky // Lasers in Surgery and Medicine. – 2004. – V. 34, Issue 2. – P. 127–135.

43. Способ определения физико-биологических характеристик кожи / [Долотов Л. Е., Синичкин Ю. П., Утц С. Р.] // Патент РФ № 2251963 МПК7 А61В5/00 / заявл. 01.08.2003; опубл. 20.05.2005; Бюл. № 14. – 3 с.

44. Акчурин Г. Г. Оптоэлектронный модуль для лазерной СВЧ модуляционной спектроскопии и томографии биотканей / Г. Г. Акчурин, Д. А. Зимняков, В. В. Тучин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 1. – С. 46–55.

45. Тучин В. В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях / Тучин В. В. – Саратов : Изд-во СГУ, 1998. – 452 с.

46. Акчурин Г. Г. Определение оптических параметров рассеяния биотканей *in vivo* с помощью лазера с синхронизацией мод / Г. Г. Акчурин, А. Ю. Угнищев // Оптика и спектроскопия. – 1994. – Т. 76. – С. 158–165.

47. Matcher S. J. In vivo measurements of the wavelength dependence of tissue-scattering coefficients between 760 and 900 nm measured with time-resolved spectroscopy / S. J. Matcher, M. Cope, D. T. Delpy // Appl. Opt. – 1997. – V. 36, Issue 1. – P. 386–396.

48. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы) / Гуревич М. М. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 204 с.

49. Левин Г. Г. Оптическая томография / Г. Г. Левин, Г. Н. Вишняков. – М. : Радиосвязь, 1989. – 240 с.
50. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию / В. И. Малышев. – М. : Наука, 1979. – 478 с.
51. Афанасьев В. А. Оптические измерения / В. А. Афанасьев. – М. : Высшая школа, 1981. – 228 с.
52. Зеге Э. П. Инженерные методы расчета световых полей в условиях многократного рассеяния / Э. П. Зеге. – Мн. : Навука і тэхніка, 1982. – С. 84–105.
53. Зеге Э. П. Перенос изображения в рассеивающей среде / Э. П. Зеге, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Мн. : Навука і тэхніка, 1985. – 327 с.
54. Sumpner W. E. The diffusion of light / W. E. Sumpner // Proc. Phus. Soc. of London. – 1982. – V. 12. – P. 10–28.
55. Пришивалко А. П. Основные направления современной теории рассеяния и поглощения излучения отдельными частицами / А. П. Пришивалко, В. А. Бабенко // Распространение света в дисперсной среде. Мн. : Наука и техника, 1982. – С. 7–22.
56. Барабаненков Ю. Н. К спектральной теории переноса излучения / Ю. Н. Барабаненков // ЖТЭФ. – 1969. – Т. 56, № 4, – С. 1262–1272.
57. Марчук Г. И. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучения / Г. И. Марчук. – М. : Атомиздат, 1967. – 256 с.
58. Иванов В. В. Столетие интегрального уравнения переноса излучения / В. В. Иванов // Рассеяние и поглощение света в природных и искусственных дисперсных средах. – Мн. : ИФ АН Белоруси, 1991. – С. 10–36.
59. Гермогенова Т. А. Численные методы решения краевых задач для уравнения переноса / Т. А. Гермогенова // Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. – Мн. : Навука і тэхніка, 1971. – С. 29–42.
60. Гермогенова Т. А. Развитие численных методов решения уравнения переноса излучения / Т. А. Гермогенова // Распространение света в дисперсной среде. – Мн. : Навука і тэхніка, 1982. – С. 105–118.
61. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде / К. С. Шифрин. – М. : Гостехиздат, 1957. – 276 с.

62. Integrating Sphere for Imperfectly Diffuse Samples / D. K. Edwards, J. F. Gier, K. E. Nelson [et al.] // Journ. Opt. Soc. Amer. – 1961. – V. 51. – P. 1279–1288.
63. Ulbricht R. Das Kugelphotometer / R. Ulbricht // Elektrotech. Zeits. – 1900. – V. 21. – P. 595.
64. Куликовский К. Л. Методы и средства измерений / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
65. Марков П. И. Волоконно-оптические преобразователи в приборах технологического контроля / П. И. Марков, В. М. Шаповалов. – Минск : Наука и техника, 1983. – 112 с.
66. Новицкий Л. А. Оптико-электронные приборы для научных исследований / Новицкий Л. А. – М. : Машиностроение, 1986. – 432 с.
67. Бебчук Л. Г. Прикладная оптика : учебное пособие для приборостроительных специальностей вузов / Л. Г. Бебчук, Ю. В. Богачев, Н. П. Заказнов. – М. : Машиностроение, 1988. – 312 с.
68. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике / М. И. Эпштейн. – М. : Энергия, 1975. – 247 с.
69. Приезжаев А. В. Лазерная диагностика в биологии и медицине / А. В. Приезжаев, В. В. Тучин, Л. А. Шубочкин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 240 с.
70. Хайрулина А. Я. Оптические и биофизические параметры биотканей в норме и патологии, методы их определения в видимой и ближней ИК-областях спектра, основанные на многократном рассеянии / А. Я. Хайрулина // Инженерно-физ. журнал. – 1996. – Т. 69, № 3. – С. 390–398.
71. Хайруллина А. Я. Исследование биоклеток методами светорассеяния / А. Я. Хайруллина // Распространение света в дисперсной среде. – Мн. : Навука і тэхніка, 1982. – С. 275–292.
72. Хайрулина А. Я. Диагностика крови методами оптики рассеивающих сред / А. Я. Хайруллина. – Мн. : ИФ АН Беларусі, 1986. – 50 с.
73. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах / А. Исимару. – М. : Мир, 1981. – 280 с.
74. Ньютон Р. Теория рассеяния волн и частиц / Р. Ньютон. – М. : Мир, 1969. – 259 с.
75. Степанов Б. И. Введение в современную оптику : квантовая теория взаимодействия света и вещества / Б. И. Степанов. – Мн. : Навука і тэхніка, 1990. – 319 с.

76. Степанов Б. И. Основные проблемы спектроскопии рассеивающих сред / Б. И. Степанов // Изв. АН СССР: физ. – 1957. – Т. 21. – С. 84–105.

77. О применении методов спектроскопии светорассеивающих сред при биофизических исследованиях одноклеточных организмов и их суспензий / Ф. Я. Сидько, И. А. Терсков, Н. С. Ерошин [и др.] // Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. – Мн. : Наука і тэхніка, 1971. – С. 361–374.

78. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи / С. В. Павлов, В. П. Кожем'яко, В. Г. Петрук [та ін.]. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2007. – 254 с.

79. Павлов С. В. Разработка и исследование оптоэлектронной информационно-измерительной системы преобразования биомедицинской информации : дис...канд. тех. наук : 05.11.16 / С. В. Павлов ; Вінницький державний технічний університет. – Вінниця, 1995. – 193 с.

80. Петрук В. Г. Метрологічні особливості технології зразкових засобів оптичних вимірювань / В. Г. Петрук // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1998. – № 54. – С. 56–59.

81. Томчук М. А. Інформаційно-вимірювальна система для неінвазивної спектрофотометрії біотканин : дис...канд. тех. наук : 05.11.16 / М. А. Томчук. – Вінницький державний технічний університет. – Вінниця, 2001. – 197 с.

82. Пристрій для неінвазивної оптичної діагностики матеріалів біомедичного походження : Патент України № 46340А : МПК₇ G01N 21/47, 21/55 / Петрук В. Г., Черноволик Г. О., Васильківський І. В., Томчук М. А. ; заявник і патентовласник Вінницький державний технічний університет. – № 2001064415 ; заявл. 23.06.2001 ; опубл. 15.05.2002, Бюл. № 5.

83. Пристрій для неінвазивної оптичної діагностики матеріалів біомедичного походження : Патент України № 33082А : МПК₇ G01N 21/47 (2006.01), G01N 21/55 (2006.01), G01N 33/483 (2006.01) / Петрук В. Г., Томчук М. А. ; заявник і патентовласник Вінницький державний технічний університет. – № 98115850; заявл. 03.11.1998 ; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1.

84. Пристрій для неінвазивної оптичної діагностики матеріалів біомедичного походження : Патент України № 33078А : МПК₇ G01N 21/47 (2006.01), G01N 21/55 (2006.01) / Петрук В. Г., Томчук М. А.,

Біленський О. А., Біляга Р. В. ; заявник і патентовласник Вінницький державний технічний університет. – № 98115815; заявл. 03.11.1998 ; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1.

85. Петрук В. Г. Розробка та аналіз математичної моделі трансформації випромінювання біотканиною / В. Г. Петрук, М. А. Томчук, Г. О. Черноволик, Ю. А. Бозняк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 2. – С. 18–22.

86. Розробка нових принципів діагностики стану нормальних та патологічних біотканин за спектрами дифузного відбиття (теоретичні та експериментальні дослідження) / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик [та ін.] // Пріоритети наукової співпраці ДФФД і БРФФД : матеріали спільних конкурсних проектів ДФФД і БРФФД (“ДФФД-БРФФД – 2005”). – К. : ДІА, 2007. – С. 35–47.

87. Петрук В. Г. Математична модель трансформації випромінювання у патологічних тканинах / В. Г. Петрук, Г. О. Черноволик, М. А. Томчук, С. В. Шевчук // Наукова конференція Укр. НДІРІ : збірник матеріалів. – Вінниця, 2003. – С. 7–11.

88. Спектрофотометрична діагностика системних патологій біотканин із застосуванням апарату нечіткої логіки / В. Г. Петрук, Г. О. Черноволик, М. А. Томчук, Ю. О. Безсмертний // PHOTONICS–ODS 2005 : міжнар. науков. конф. з оптоелектронних інформаційних технологій, 26–28 квітня 2005 р : матеріали конференції. – Вінниця, Універсум-Вінниця. – С. 164.

89. Модернізація інтерактивних оптичних засобів для діагностики фізіологічного стану людини на основі спектрофотометрії та лазерної поляриметрії / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик [та ін.] // I-й Всеукраїнський з'їзд екологів : міжнар. науков. конф., 4–7 жовтня 2006 р. : збірник матеріалів. – Вінниця : Універсум-Вінниця. – С. 181.

90. Модель прийняття рішення при встановленні давності смерті на основі нечіткої логіки / В. Г. Петрук, Г. О. Черноволик, С. Д. Штовба, О. І. Моканюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технічних процесах. – 2000. – № 1. – С. 121.

91. Експертна система підтримки прийняття рішення для діагностики типу больового синдрому з урахуванням результатів аналізу спектрофотометричних параметрів біологічних тканин / В. Г. Петрук, Г. О. Черноволик, М. А. Томчук, Ю. О. Безсмертний //

Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 3(7). – С. 102–107.

92. Математична модель перетворення випромінювання приповерхневим шаром біотканини з системною патологією / В. Г. Петрук, Г. О. Черноволик, С. В. Шевчук, Ю. О. Безсмертний // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2002. – № 2. – С. 154–58.

93. Processing of optical information for medical decision support system by intelligent / A. Rotshtein, V. Petruk, S. Shtovba, G. Chernovolik // PHOTONICS – ODS 2000 : International Conference, 2 – 4 oct. 2000. – Vinnytsia, 2000. – P. 94.

94. Черноволик Г. О. Методика нормування експериментальних результатів вимірювань спектрів дифузного відбиття / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик // Автоматика 2006 : збірник матеріалів XIII міжнар. науков. конф. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2006. – С. 177.

95. Черноволик Г. О. Розробка нових принципів діагностики стану нормальних і патологічних біотканин за спектрами їх дифузного відбиття / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик, А. П. Іванов, В. В. Барун // Автоматика 2006 : збірник матеріалів XIII міжнар. науков. конф. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2006. – С. 178.

96. Черноволик Г. О. Комп'ютерно-вимірювальна система діагностики стану нормальних і патологічних біотканин за спектрами їх дифузного відбиття / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик [та ін.] // ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2006 : міжнар. науков. конф., 10–14 жовтня, 2006 р. : збірник матеріалів, Т. 1. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2006. – С. 118–120.

97. Вопросы кибернетики: Задачи медицинской диагностики и прогнозирования с точки зрения математика / Под ред. И. М. Гельфанда. – М. : АН СССР, 1985, вып. 112. – 195 с.

98. Гублер Е. В. Вычислительные методы анализа и распознавания патологических процессов / Е. В. Гублер. – М. : Медицина, 1978. – 186 с.

99. Минцер О. П. Биологическая и медицинская кибернетика : справочник / О. П. Минцер, В. Н. Молоков. – К. : Наукова думка, 1986. – 374 с.

100. Информационные системы в медицине / [под ред. Ю. И. Лисицына]. – М. : Мир, 1974. – 171 с.

101. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему / К. Нейлор. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 234 с.
102. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта / Н. Нильсон. – М. : Радио и связь, 1985. – 258 с.
103. Мечитов А. И. Интерактивная система формирования базы знаний в задачах экспертной классификации. Экспертные системы / А. И. Мечитов, Е. М. Мошкович, Е. М. Фумс – М. : 1986. – С. 87–93.
104. Бейли Н. Математика в биологии и медицине / Н. Бейли. – М. : Мир, 1970. – 326 с.
105. Хофман Д. Интеллектуальные измерения для получения объективной информации в науке и технике / Д. Хофман, К. Карайя. – 1985. – Т. 1. – Прага. – 16 с.
106. Хаимзон И. И. Новые информационные технологии ведения, учета и обработки медицинской информации / И. И. Хаимзон. – К. : Вища школа, 1992. – 144 с.
107. Хаимзон И. И. Новые информационные технологии в медицине / И. И. Хаимзон // Медицинская техника. – 1992. – № 3. – С. 24–29.
108. Резник Л. К. Проблемы использования экспертных систем в интеллектуальных средствах измерений / Л. К. Резник // Мера – 90 : междунар. конф. : сб. докл. – М., 1990. – С. 157–165.
109. Геловани В. А. Экспертные системы в медицине (новое в жизни, науке, технике) / В. А. Геловани, О. В. Ковригин // Математика, кибернетика. – М. : Знание, 1987. – 23 с.
110. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам / Д. Уотермен. – М. : Мир, 1989. – 388 с.
111. Построение экспертных систем / Ред. Ф. Хейес-Рот, Д. Уотерман, Д. Ленат. – М. : Мир, 1987. – 441 с.
112. Ferraris F. Man-machine interface in intelligent measurement instrumentation / F. Ferraris, M. Parvis // Proc. of 11 th Congress of IMEKO. – Houston, 1988. – P. 85–95.
113. Processing of optical information for medical decision support system by intelligent / A. P. Rotshtein, V. G. Petruck, S. D. Shtovba, G. A. Chernovolik // Selected Papers from the International Conference on “Optoelectronic Information Technologies”(Ed. Sergei V. Svechnicov, Volodymyr P. Kojemiako, Sergey Al. Kostyukevych), Proceedings of SPIE, Vynnytsia, 2001. – P. 142–147.

114. Intelligent Instrumentation Products: The handbook of personal computer instrumentation for data acquisition, test, measurement and control / Burr-Brown Corp. and Intelligent Instrumentation Inc., 1989. – 282 p.
115. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 167 с.
116. Козак А. А. Анализ надежности информационно-измерительных систем на ранних этапах проектирования / А. А. Козак, П. О. Кузнецов, А. П. Ротштейн // Стандартизация и измерительная техника. – 1976. – Вып. 2. – Красноярск. – С. 128–131.
117. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М. : Радио и связь, 1982. – 432 с.
118. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д. А. Поспелова. – М. : Наука, 1986. – 312 с.
119. Нечеткие множества и теория возможностей : последние достижения / под ред. Р. Р. Ягера. – М. : Сов. Радио, 1977. – 216 с.
120. Ротштейн А. П. Медицинская диагностика на нечеткой логике / А. П. Ротштейн. – Винница : Континент-ПРИМ, 1996. – 132 с.
121. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница : Універсум-Вінниця, 1999. – 320 с.
122. Митюшкін Ю. І. Soft computing: ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань : монографія / Ю. І. Митюшкін, Б. І. Мокін, О. П. Ротштейн – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.
123. Черноволик Г. О. Метод побудови функцій належності нечітких множин / О. П. Ротштейн, Г. О. Черноволик, Є. П. Ларюшкин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1996. – № 3. – С. 72–75.
124. Shtovba S. D. Fuzzy rules based system for decision making support of pathology-anatomist / S. D. Shtovba, G. A. Chernovolik // Proc. of the ERUDIT-Workshop «Fuzzy Diagnostic and Therapeutic Decision Support» (Ed. Klaus-Peter Adlassnig), Vienna, Austria, 2000. – P. 47–52.
125. Ротштейн О. П. Диференційна діагностика ішемічної хвороби серця на основі нечіткої логіки / О. П. Ротштейн, М. О. Жупанова, В. М. Шеверда // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1995. – № 4(9). – С. 52–58.

126. Тиходеев П. М. Световые измерения / П. М. Тиходеев. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 464 с.
127. Поджаренко В. О. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук. – К. : УМК ВО, 1991. – 206 с.
128. Володарський Є. Т. Метрологічне забезпечення вимірювань та контролю / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : Велес, 2001. – 220 с.
129. Володарский Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е. Т. Володарский, Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – К. : Выща школа, 1987. – 280 с.
130. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 524 с.
131. Полішко С. П. Точність засобів вимірювання / С. П. Полішко, О. Д. Трубенюк. – К. : Вища школа, 1992. – 356 с.
132. Основи метрології та вимірювальної техніки. Основи метрології : підручник: 1т. / М. Дорожець, В. Мотало, Б. Стадник [та ін.]. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 525 с.
133. Коротков В. П. Основы метрологии и теория точности измерительных устройств : учеб. пособие / В. П. Коротков, Б. А. Тайц. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 352 с.
134. In-vivo characterization of optical properties of pigmented skin lesions including melanoma using oblique incidence diffuse reflectance spectrometry / A. Garcia-Uribe, E. B. Smith, J. Zou. [et al.] // Journal of Biomedical Optics. – 2011. – V. 16(2):020501. – P. 1–3.
135. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применения пакета прикладных программ STATISTICA / О. Ю. Реброва. – М. : МедиаСфера, 2002. – 312 с.
136. Пересмотренный вариант единых стандартов представления результатов рандомизированных контролируемых испытаний (CONSORT): разъяснения и перспективы дальнейшего усовершенствования / Д. Г. Альтман, К. Ф. Шульц, Д. Мохер [и др.] // Международный журнал мед. практики, 2001. – № 4. – С. 5–34.
137. Аналіз сучасного стану оптичних засобів вимірювального контролю та діагностування параметрів біотканин на основі цифрової колориметрії / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк

[та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С. 172–177.

138. Метод та засіб цифрової колориметрії поверхневих пошкоджень біотканин для прикладних задач судово-медичної діагностики / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С. 177–181.

139. Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль інтегральних параметрів забруднення водних об'єктів за допомогою біоіндикації по фітопланктону / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. А. Стискал [та ін.]. // Екологічна безпека держави: тези допов. ІХ Всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих учених та студентів. – К. : НАУ, 2015. – С. 118.

140. Спектрофотометрические характеристики пигментных образований кожи / В. Г. Петрук, А. П. Иванов, С. М. Кватернюк [и др.] // Медицинская физика и инновации в медицине (ТКМФ-6) : материалы VI Троицкой конференции. М., 2014. – С. 81–83.

141. Non-Invasive Optical Diagnostics of Pigment Formations of Human Skin / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, A. P. Ivanov [et al.] // Microelectronics and Computer Science : proceeding of the 8th International Conference. – Chisinau : Tehnica-UTM, 2014. – P. 421–423.

142. Петрук В. Г. Методи та засоби контролю оптичних параметрів природних середовищ на основі мультиспектральних зображень / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. А. Петрова // Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : матеріали 3-го міжнародного конгресу. – Львів, 2014. – С. 44.

143. Спектрофотометрические методы диагностики меланомы кожи. I. Коэффициенты диффузного отражения / А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк [и др.] // Медэлектроника-2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник науч. стат. VIII междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГУИР, 2014. – 273–275.

144. Спектрофотометрические методы диагностики меланомы кожи. II. Статистические характеристики коэффициентов диффузного отражения / А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк [и др.] // Медэлектроника-2014. Средства медицинской электроники и новые

медицинские технологии : сборник науч. стат. VIII междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГУИР, 2014. – С. 276–279.

145. Кватернюк С. М. Спектрополяриметричний контроль концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ : монографія / С. М. Кватернюк, В. Г. Петрук. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 156 с.

146. Research of the spectral diffuse reflectance in vivo / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, D. B. Bolyuh [et al.] // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications. – 2012. – V.86980F. – P. 1–6.

147. Аналіз оптичних засобів діагностування поверхневих пошкоджень біотканин у судовій медицині / В. Г. Петрук, О. Є. Кватернюк, С. М. Кватернюк [та ін.] // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012) : матеріали XI Міжнар. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 128–129.

148. Засоби неінвазивної діагностики меланому на основі спектрофотометрії та обробки зображень / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Д. Б. Болух [та ін.] // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012) : матеріали XI Міжнар. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 129–130.

149. Неинвазионная диагностика меланомы кожи на основе спектрофотометрии и обработки изображений / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Д. Б. Болух [и др.] // Медэлектроника – 2012: Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : материалы VII МНТК. – Минск, 2012. – С. 83.

150. Розробка засобів неінвазивної діагностики поверхневих онкопатологій на основі спектрофотометрії та мультиспектральних зображень / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Д. Б. Болух [та ін.] // Оптиелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС– 2012 : збірник тез допов. шостої міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця: Едельвейс, 2012. – С. 126.

151. Развитие оптических методов диагностики биологических тканей по рассеянному излучению. I. Спектры отражения / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук [и др.] // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2010. – № 3. – С. 90–98.

152. Развитие оптических методов диагностики биологических тканей по рассеянному излучению. II. Поляризационная пространственно-разрешающая спектроскопия. / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук [и др.] // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2010. – № 4. – С. 79–89.

153. Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в кожном покрове / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук [и др.] // Проблемы оптической физики и биофотоники : материалы 12-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. – Саратов, 2009. – С. 69–78.

154. Спектральные особенности распространения света в морской воде с сильно поглощающими водорослями / В. В. Барун, С. М. Кватернюк, А. П. Иванов [и др.] // Проблемы оптической физики и биофотоники : материалы 12-той Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. – Саратов, 2009. – С. 78–85.

155. Дослідження інтерактивного поляризаційного спектроекстинкциметра / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, В. І. Солоненко [та ін.] // Применение лазеров в медицине и биологии : тези допов. XXII міжнар. наук.-практ. конф. – Ялта, 2007. – С. 134–135.

156. Розробка інтерактивних оптичних засобів для поляризаційної діагностики біотканин та гуморальних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик [та ін.] // Применение лазеров в медицине и биологии : тези допов. XXII міжнар. наук.-практ. конф. – Ялта, 2007. – С. 135–136.

157. Контрольно-вимірювальна система для дослідження оптичних параметрів біотканин / В. Г. Петрук, Г. О. Черноволик, С. М. Кватернюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 5. – С. 18–21.

158. Разработка портативного измерителя коэффициента диффузного отражения света биологическими тканями / А. П. Иванов, В. В. Барун, В. Г. Петрук [та ін.] // Альманах клинической медицины. – 2006. – Т. XII. – С. 27.

159. Петрук В. Г. Неінвазивна спектрофотометрична експрес-діагностика онкозахворювань / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк // Оптиелектронні інформаційні технології «Фотоніка-ОДС 2005» : тези допов. III міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця, 2005. – С. 154.

Наукове видання

**Черноволик Галина Олександрівна
Петрук Василь Григорович
Кватернюк Сергій Михайлович**

**МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ
ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ НЕОДНОРІДНИХ
БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено С. Кватернюком

Підписано до друку 16.12.2015 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,08.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-41

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

publish.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.