

УДК 535.2.616

¹Ж.М. ХОМЕНКО, ²А.К., ЗИЛЬГАРАЕВА, ³С.В.ПАВЛОВ, ³О.С. БЕЗКРЕВНИЙ ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БІОТКАНИН

¹Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська 103, м. Житомир, Україна.
E-mail: joanekhomenko@gmail.com

²Казахський національний дослідний технічний університет імені К.І. Сатбаєва

³Вінницький національний технічний університет

Спектрофотометрія як метод заснована на пропусканні випромінювання через досліджуваний зразок реєстрації розсіяного випромінювання. Показано, що широкі функціональні можливості методу спектрофотометрії не використовуються в повній мірі в медичній діагностиці *in vivo*. Для опису реєстрованого розсіяного в зворотному напрямку випромінювання проаналізовані морфологічні особливості клітин і тканин і вибрано відповідне спрощене математичне рішення задачі розсіювання на основі показника заломлення, форми і розміру досліджуваних клітин і їх органел. розглянуто чутливість формул до кожного параметру. виявлено залежність транспортного коефіцієнта розсіювання від анатомічних характеристик структури тканин на клітинному рівні. У сучасній технічній реалізації метод дозволяє кількісно оцінювати такі оптичні параметри, як коефіцієнт поглинання μ_a транспортний коефіцієнт розсіювання μ_s , які відображають, відповідно, компонентний склад хромофорів і величину інтегрального поглинання біологічної тканини.

Ключові слова: спектральні властивості, фотометрія, транспортний коефіцієнт, біологічна тканина.

Spectrophotometry as a method is based on the transmission of radiation through the studied sample of registration of scattered radiation. It is shown that the wide functionality of the spectrophotometry method is not fully used in medical diagnostics *in vivo*. To describe the registered radiation scattered in the opposite direction, the morphological features of cells and tissues were analyzed and the corresponding simplified mathematical solution of the scattering problem based on the refractive index, shape and size of the studied cells and their organelles was selected. the sensitivity of formulas to each parameter is considered. the dependence of the transport scattering coefficient on the anatomical characteristics of the tissue structure at the cellular level is revealed. In modern technical implementation, the method allows to quantify such optical parameters as the absorption coefficient of the transport scattering coefficient, which reflect, respectively, the component composition of chromophores and the value of the integrated absorption of biological tissue.

Key words: spectral properties, photometry, transport coefficient, biological tissue.

DOI: 10.31649/1681-7893-2020-39-1-52-60

ВСТУП

Оптичні методи дослідження в біомедичній практиці засновані на законах випромінювання, поширення і взаємодії світла з речовиною. До них відносять методи прямого візуального спостереження і контролю медично-біологічних об'єктів з використанням лінз, мікроскопів, освітлювачів, фото- і кіноапаратури.

До найбільш широко розповсюджених в біології і медицині оптичних методів належить спектроскопія. Розрізняють електронну спектроскопію (ультрафіолетову і видиму), коливальну й обертальну (інфрачервону, комбінаційного розсіювання, а також мікрохвильову і радіоспектроскопію). Областю застосування є визначення атомного і молекулярного складу речовини, її структури, концентрації й ін. [1,2].

Спектральний аналіз за характером розв'язуваних задач можна поділити на елементний (визначення складу зразка по елементах), ізотопний (визначення складу зразка по ізотопах), молекулярний (визначення молекулярного складу зразка) і структурний (визначення структурних складових молекулярного з'єднання). Для проведення спектрального аналізу використовують спектроскопи, спектрографи,

спектрометри і спектрофотометри. Поряд з останніми при аналізі складу, концентрації і структури речовин використовують колориметри і фотометри.

Різні види спектрального аналізу дозволяють одержати інформацію про структуру біологічно важливих молекул і про їх взаємодію з іншими компонентами. Концентрація і властивості оптично активних молекул досліджуються спеціальним оптичним методом – поляриметрією, заснованою на вимірюванні за допомогою поляриметрів кута обертання площини поляризації світла, яке проходить через оптично активне середовище поляризованим. Метод поляриметрії використовується в медичній практиці для визначення концентрації цукру в сечі, вуглеводів у рослинній сировині, концентрації і стану білків і нуклеїнових кислот, для дослідження активності ферментів, що розщеплюють вуглеводи та ін.

У медицині використовується також метод рефрактометрії, заснований на вимірюванні показника заломлення світла в досліджуваному середовищі. Він застосовується для визначення чистоти дистильованої води, концентрації сахарози, вмісту білка в сироватці крові, аналізу розчинів для ін'єкцій, препаратів лікарських сумішей, для вимірювання концентрації спирту в настоянках. По величині показника заломлення можна визначити вологість різних харчових продуктів, вміст білка в молоці. Методи рефрактометрії використовуються при дослідженні рефракції ока [1,2,3].

Існують оптичні методи, що дозволяють виміряти величину розсіювання світла об'єктом (колоїдними розчинами, суспензіями й ін.). Прилади, призначені для дослідження світлорозсіювання, одержали назву нефелометрів і турбідиметрів. За допомогою цих методів визначають молекулярну масу і розміри різних макромолекул (білків, нуклеїнових кислот) і часток у колоїдних розчинах, суспензіях, а також одержують інформацію про характер міжмолекулярних взаємодій [1,2,7].

КЛАСИФІКАЦІЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ В БІОЛОГІЧНИХ ТА БІОМЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Застосування спектрофотометричних методів у біології і медицині засновано на використанні широкого кола явищ, пов'язаних із різноманітними проявами взаємодії світла з біологічними об'єктами. Оптичне випромінювання, так само як і звичайне світло, може відбиватися, поглинатися, розсіюватися, перевипромінюватися біологічним середовищем, і кожний із цих процесів несе інформацію про мікро- і макроструктуру цього середовища, рух і форму окремих його складових. Червоне, інфрачервоне (ІЧ) та ультрафіолетове (УФ) світло можуть надавати фотобіохімічну дію. Яскравими прикладами цього є фотосинтез рослин і бактерій, а також механізм зору. Високоінтенсивне світлове випромінювання ультрафіолетового (УФ), видимого червоного та інфрачервоного (ІЧ) діапазонів довжин хвиль робить руйнівну (деструктивну) дію на біологічні об'єкти [1,2].

Особливим та найпоширенішим в природі класом об'єктів в біомедичних дослідженнях 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 і т.д. 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 [1,2]. Окрім біооб'єктів [1,2,3] є ще інший великий клас неоднорідних об'єктів – це тверді тіла з дзеркальною чи шорсткою поверхнею [1,2,3,6]. 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 спектрофотометричних методів в основному, проводився по дослідженню названих об'єктів. Тому вони розвинені досить добре. Але традиційно оптичні характеристики таких об'єктів розглядались 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. Класифікація об'єктів спектрофотометричних вимірювань наведено на рис. 1 [2,3,6].

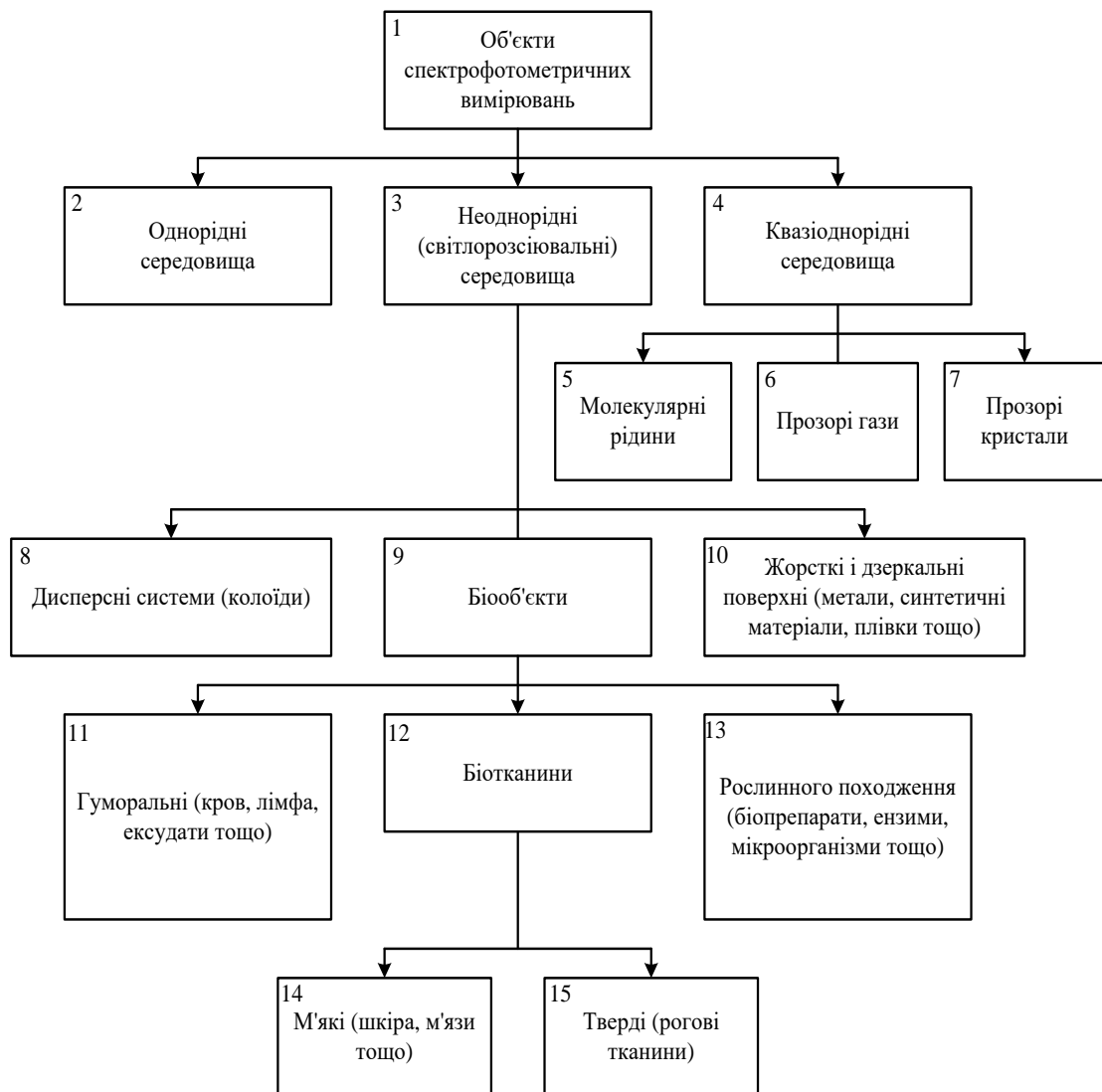


Рис. 1. Класифікація об'єктів спектрофотометричних методів в біомедичних дослідженнях [2,3]

В останній час значні успіхи має спектрофотометрія ближнього ІК при дослідженні мікроциркуляції судин головного мозку, ступеня оксигенації тканин мозку людини, особливо у новонароджених і плода [2,3,4]. Достатня прозорість для ІК-випромінювання тканин голови новонародженого і її невеликі розміри, а також доступність спектрометрів з охолоджуваними матричними детекторами дозволили

створити спектральні системи візуалізації ділянок тканин мозку з різним ступенем оксигенації. У світі налічується вже більше 500 комерційних клінічних приладів різного ступеня складності для моніторингу ступеня оксигенації, змісту цитохром оксидази і гемодинаміки біотканин [2,3,4].

На цей час випускаються компактні рефлектометри на основі світлодіодів для об'єктивного контролю змін в шкірі (ерітеметри і меланінометри, оксиметри та ін.), які обумовлені, наприклад, впливом УФ-випромінювання або будь-якого іншого зовнішнього впливу, наприклад теплового або механічного, а також для контролю зміни метаболічного або патологічного характеру (запальні і пухлинні процеси) [3,4]. З використанням вимірних коефіцієнтів відбиття на характерних довжинах хвиль у видимій області (560-570 нм, 635-650 нм, 695-710 нм), відповідних спектрах поглинання гемоглобіну і меланіну, визначаються ступінь почервоніння (еритема) і ступінь пігментації шкіри, що служить критеріями дозування при лазерної або фототерапії, а також дозволяє здійснювати діагностику та моніторинг різних запалень і злоякісних новоутворень [2,3,5].

Методи спектрофотометрії використовується в різних галузях неінвазивної біомедичної діагностики. Вони мають ряд переваг над іншими методами (рентгенівськими, електричними, ультразвуковими та ін.), оскільки низькоінтенсивне лазерне випромінювання, яке використовується в даному випадку, не здійснює такого впливу, що може негативно впливати на організм людини чи вносити негативний фактор (похибку) в отримані результати досліджень [5].

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ В БІОМЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Історично найпершими згадуваннями використання зміни щільності світлового потоку для відображення стану серцево-судинної системи можуть вважатися дослідження Бонсмана [2,3], проведені дослідження Нойонсона на тваринах та дослідження Мейтса на мочці вуха. Систематизуючим внеском у можливість спектрофотометричних методів є досліді, розпочаті Гертсманом, який протягом трьох десятиріч вивчав можливість квантифікації фотоплетизмограм (ФПГ) та її кореляції з кровотоком. Ним разом з робочою групою Тюрнера була зроблена спроба відокремити пульсівний компонент за допомогою використання фільтра на шляху фотоелектричного сенсора. Однією з головних перешкод спробам числової характеристики ФПГ є індивідуальна різниця в кольорі та товщині шкіри пацієнта. Харді і дослідники [2] дослідили вплив кольору шкіри на залежність коефіцієнтів відбиття і пропускання від довжини хвилі (діапазон від 0,55 до 2,4 мкм). На довжинах хвиль до 1 мкм колір шкіри мав сильний вплив на поглинання зовнішніми шарами шкіри, але мав лише незначний ефект на оптичні властивості шкіри в діапазоні від 1 до 2,4 мкм. Ці властивості були також визначені Джекезом [2,3], який знайшов оптичні властивості шкіри незалежними від пігментації при довжинах хвиль більших за 1,2 мкм. Він також підтвердив наявність різниці у відбивальних властивостях шкіри з різною пігментацією при використанні діапазону довжин хвиль від 0,3 до 0,7 мкм (рис. 2).

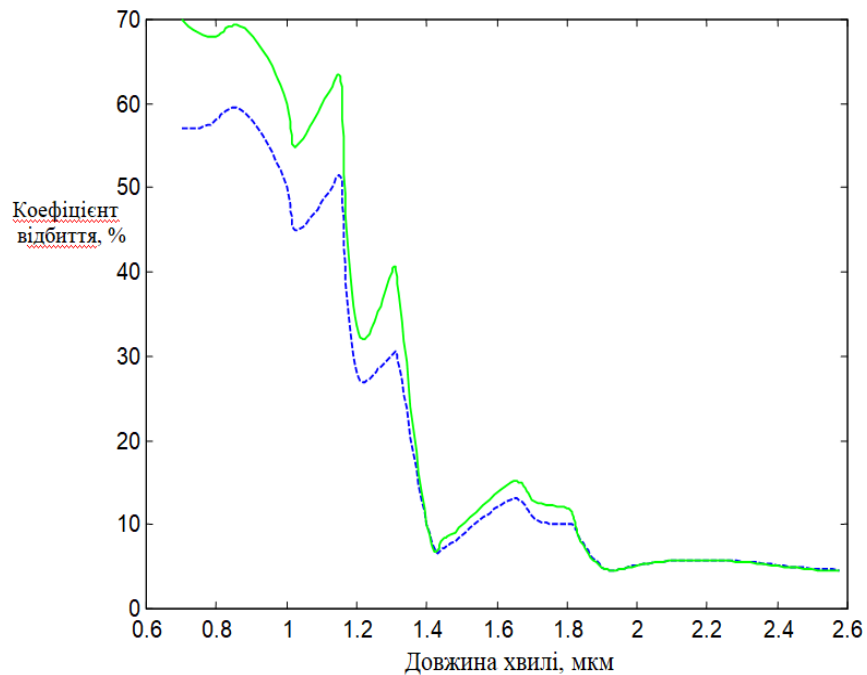


Рис.2. Залежність коефіцієнта відбиття шкіри від довжини хвилі

Безперервна лінія характеризує світлу шкіру, пунктирна характеризує смугляву шкіру молодого білого чоловіка

Традиційні методи контролю та вимірювань оптичних характеристик вже не у повній мірі задовольняють вимоги сучасної спектроскопії світлорозсіювальних об'єктів, а тому потребують подальших наукових пошуків, нових розробок, суттєвого вдосконалення, автоматизації та інтелектуалізації.

Вимірювання спектрів пропускання речовин в різних агрегатних станах є основою спектрофотометрії, що відрізняється надзвичайною простотою, універсальністю, порівняно високою чутливістю і точністю аналізу, цілком достатніх при вирішенні багатьох завдань фундаментальної і прикладної медицини. Вимірювання спектрів пропускання засноване на реєстрації інтенсивності падаючого I і пройденого в поглинаючому середовищі шлях z світла I в залежності від довжини хвилі λ :

$$I(\lambda, z) \equiv I_0(\lambda) \cdot \exp[-\mu_a(\lambda)z]$$

$$\mu_a(\lambda) = \sigma_a(\lambda)N$$

де $\mu_a(\lambda)$ - коефіцієнт поглинання; $\sigma_a(\lambda)$ - ефективний поперечний переріз поглинаючих частинок, см^2 ; N - їх щільність, см^{-3} .

Передбачається, що інтенсивність падаючого світла дуже мала. Для невеликих коефіцієнтів поглинання, коли $\exp[-\mu_a(\lambda) \cdot z] \approx 1 - \mu_a(\lambda) \cdot z$, легко знайти, що

$$\mu_a(\lambda) \approx \frac{I_0(\lambda) - I(\lambda, z)}{I_0(\lambda)} \cdot z \equiv \frac{\Delta I(\lambda, z)}{I_0(\lambda) \cdot z}$$

У нелазерних спектрофотометрах використовуються широкосмугові джерела світла, а перебудову по довжинах хвиль здійснюють за допомогою призм або дифракційних решіток. Вони мають роздільну здатність, $\Delta\lambda$, від декількох до сотих часток нанометра. Якщо ширина лінії поглинання дорівнює $\delta\lambda$, а $I_0(\lambda)$ несильно змінюється в інтервалі $\Delta\lambda$, то

$$\frac{\Delta I}{I_0} \approx \frac{\mu_a(\lambda)\delta\lambda}{\Delta\lambda}$$

де $\mu_a(\lambda)$ - коефіцієнт поглинання, усереднений по всій лінії поглинання [7].

Звідси випливає висновок, що для вузьких ліній поглинання чутливість залежить не тільки від здатності приладу зареєструвати малі зміни ΔI на тлі значного минулого сигналу, але і від роздільної здатності приладу. Зазвичай гранична чутливість досягається при $\Delta I / I > 10^{-4} - 10^{-5}$.

Відзначимо, що методи вимірювання пропускання або поглинання світла речовиною, як правило, є диференціальними, так як в процесі вимірювань відбувається порівняння властивостей досліджуваного об'єкта з контрольним зразком, яке реалізується як в однопроменевих, так і двопробних диференціальних спектрометрах [1, 8].

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ СПЕКТРОФОТОМЕТРА ДЛЯ БІОМЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Пропонується для проведення біомедичних досліджень спектрофотометричними методами застосовувати оптоволоконний спектрометр **AvaSpec-ULS2048-USB2** до складу якого входять галогенне джерело світла **AvaLight-HAL** з джерелом живлення (1), спеціалізований світловод **FCR-7IR200-2-MS-PK-S** (2), оптичний блок (3), до складу якого входять дифракційна ґратка **NB**, щілина 50 мкм, фільтр для зменшення ефектів другого порядку **OSF-475**, референсний білий відбивач (98%) (3), оптоволоконний спектрометр **AvaSpec-ULS2048-USB2** (4), блок спряження з комп'ютером, спеціалізоване програмне забезпечення **AvaSoft-Full** та **AvaSoft-CHEM** (рис. 3).



Рис. 3 - Оптоволоконний спектрометр **AvaSpec-ULS2048-USB2**

Оптоволоконний спектрометр дозволяє неінвазивно вимірювати концентрації невідомих зразків або зміни концентрації в часі, досліджувати концентрацію кисню у крові та гемоглобіну, рівень мікросудинного кровообігу, оптичних особливостей біотканин, інше.

Характеристики системи:

- Діапазон: 500-1050 нм
- Детектор: CCD, 2048 пікселів
- Дифракційна ґратка: NB, NIR діапазон, 600 ліній/мм
- Щілина: 50 мкм

Спеціалізоване програмне забезпечення **AvaSoft-CHEM** дозволяє в режимі реального часу визначати концентрацію за допомогою спектроскопічної системи.

На рис. 4 показаний спектрометр для вимірювання спектрів пропускання *in vivo*.

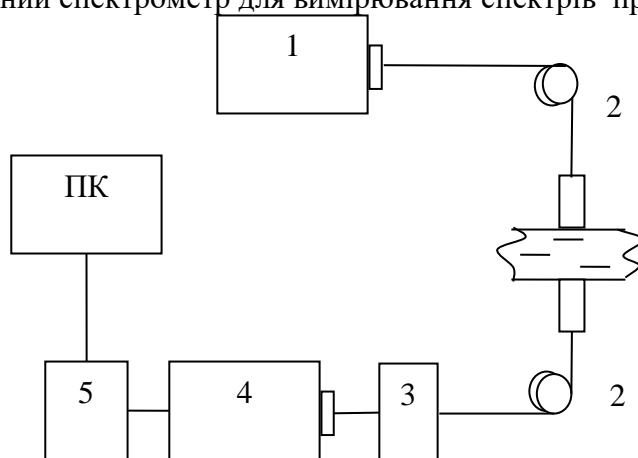


Рис. 4 – блок-схема установки для вимірювань спектру пропускання *in vivo*
 1 – монохроматор, 2 – волоконний кабель, 3 - , 4 – кремнієвий фотодіод,
 5 – підсилювач з фазовим детектором, ПК- персональний комп'ютер

Типовий спектрометр відображення для вимірювань *in vivo* і відповідні спектри для нормальної і патологічної тканини показані на рис. 5.

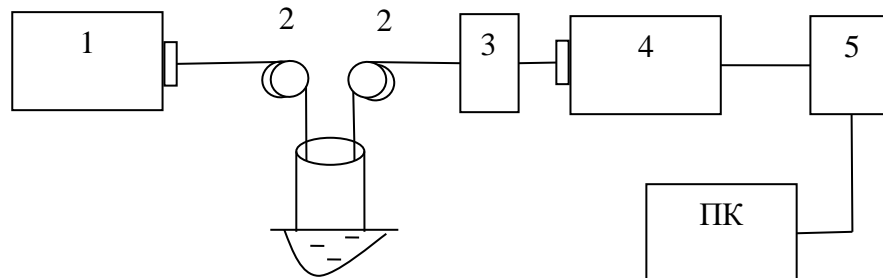


Рис. 5 – блок-схема установки для вимірювань *in vivo* спектрів відбиття
1 – монохроматор, 2 – волоконний кабель, 3 – оптичний блок, 4 – кремнієвий фотодіод, 5 – підсилювач з фазовим детектором, ПК- персональний комп'ютер

ВИСНОВКИ

Відзначимо, що спектрофотометрія - перспективний метод дослідження оптичних властивостей, складу, структури і локальних неоднорідностей біотканин. Даний метод дає кількісну оцінку глибини і обсягу ураження біологічних тканин.

Перевагою спектрофотометричного методу є можливість реєстрації змін епітелію і новоутворень внутрішніх органів, що дозволяє провести ранню діагностику захворювання і збільшує ймовірність позитивного результату лікування.

Значні успіхи має спектрофотометрія ближнього ІК діапазону при дослідженні ступеня оксигенації тканин мозку. Достатня прозорість для ІК-світла тканин голови і її розміри, а також доступність спектрометрів з охолоджуваними матричними детекторами дозволили створити спектральні системи візуалізації ділянок тканин мозку з різним ступенем оксигенації. Методики діагностики *in vivo* використовують або співвідношення інтегральних коефіцієнтів відбиття по виділених смугах, або вимір нахилу спектральних кривих по окремих ділянках спектра.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сахновский М. Ю. Исследование оптических свойств светорассеивающих сред с малым удельным поглощением : дисс. канд. физ.-мат. наук : 05.11.07. – Л. : ГОИ, 1965. – 154 с.
2. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 207 с.
3. Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Петрук В. Г., Колісник П. Ф. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи. Монографія – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 254 с.
4. Фізичні основи біомедичної оптики: Монографія / С.Павлов, В.Кожем'яко, П.Колісник, Т.Козловська, В.Думенкою – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 156 с.
5. Тучин В. В. «Оптическая биомедицинская диагностика» В 2 томах / В. В. Тучин. – Москва: Физмалит, 2007. – 560 с.
6. Безуглий М.О. Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів / М.О. Безуглий, І.І. Снявський, Н.В. Безугла, А.Г. Козловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2016, №2 (52).– С.76-81.85

7. Безуглий М.О. Контроль форми еліпсоїдальних рефлекторів біомедичних фотометрів / М.О. Безуглий, Лінючева О.В., Безугла Н.В., Бик М.В., Костюк С.А // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017, №1 (53). – С.62-69.
8. Prahл S. A. A Monte Carlo Model of Light Propagation in Tissue / S. A. Prahл, M. Keijzer, S. L. Jacques, A. J. Welch // Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology, SPIE Institute Series. – 1989. – vol. 5, – Pp. 102–111.
9. Hall G. Goniometric measurements of thick tissue using Monte Carlo simulations to obtain the single scattering anisotropy coefficient / G. Hall, S. L. Jacques. // Biomedical optics express. – 2007. – no.11. – Pp. 2707–2719.
10. Производитель биомедицинских приборов. Режим доступа: <http://www.iss.com/index.html>
11. Binding J. Brain refractive index measured in vivo with high-NA defocus-corrected full-field OCT and consequences for two-photon microscopy / J. Binding, J. B. Arous, J.-F. L?ger, S. Gigan, C. Voccarо, L. Bourdieu // OPTICS EXPRESS. – 2011. – No. 6 (19). – Pp. 4833 – 4847.

Referenses

1. Sakhnovskiy M. Yu. Issledovanie opticheskikh svoystv svetorasseivayushchikh sred s malym udel'nym pogloshcheniem : diss. kand. fiz.-mat. nauk : 05.11.07. – L. : GOI, 1965. – 154 s.
2. Petruk V. G. Spektrofotometriya svitlorozsiyuval'nikh seredovishch. – Vinnitsya : UNIVERSUM-Vinnitsya, 2000. – 207 s.
3. Pavlov S. V., Kozhem'yako V. P., Petruk V. G., Kolisnik P. F. Fotopletizmografichni tekhnologii kontrolyu sertsevo-sudinnoi sistemi. Monografiya – Vinnitsya: UNIVERSUM-Vinnitsya, 2007. – 254 s.
4. Fizichni osnovi biomedichnoi optiki: Monografiya / S.Pavlov, V.Kozhem'yako, P.Kolisnik, T.Kozlovs'ka, V.Dumenkoyu – Vinnitsya : VNTU, 2010. – 156 s.
5. Tuchin V. V. «Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika» V 2 tomakh / V. V. Tuchin. – Moskva: Fizmalit, 2007. – 560 s.
6. Bezugliy M.O. Osoblivosti vigotovlennya elipsoidal'nikh reflektoriv fotometriv / M.O. Bezugliy, I.I. Sinyavs'kiy, N.V. Bezugla, A.G. Kozlovs'kiy // Visnik NTUU «KPI». Seriya Priladobuduvannya. – 2016, №2 (52).– S.76-81.85
7. Bezugliy M.O. Kontrol' formi elipsoidal'nikh reflektoriv biomedichnikh fotometriv / M.O. Bezugliy, Linyucheva O.V., Bezugla N.V., Bik M.V., Kostyuk S.A // Visnik NTUU «KPI». Seriya Priladobuduvannya. – 2017, №1 (53). – S.62-69.
8. Prahл S. A. A Monte Carlo Model of Light Propagation in Tissue / S. A. Prahл, M. Keijzer, S. L. Jacques, A. J. Welch // Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology, SPIE Institute Series. – 1989. – vol. 5, – Pp. 102–111.
9. Hall G. Goniometric measurements of thick tissue using Monte Carlo simulations to obtain the single scattering anisotropy coefficient / G. Hall, S. L. Jacques. // Biomedical optics express. – 2007. – no.11. – Pp. 2707–2719.
10. Proyzvodytel' byomedycynskiyh pryborov. – Rezhim dostupu: <http://www.iss.com/index.html>
11. Binding J. Brain refractive index measured in vivo with high-NA defocus-corrected full-field OCT and consequences for two-photon microscopy / J. Binding, J. B. Arous, J.-F. L?ger, S. Gigan, C. Voccarо, L. Bourdieu // OPTICS EXPRESS. – 2011. – No. 6 (19). – Pp. 4833 – 4847.

ХОМЕНКО ЖАННА МИКОЛАЇВНА – к.т.н. ст.викладач кафедри Біомедичної інженерії та телекомунікацій. Державного університету «Житомирська політехніка», E-mail:joanekhomenko@gmail.com

ЗИЛЬГАРАЄВА АЛІЯ КИЛИШБАЇВНА – аспірант Казахського національного дослідного технічного університету імені К.І. Сатбаєва

ПАВЛОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету

БЕЗКРЕВНИЙ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ – аспірант кафедри Лазерної та оптикоелектронної техніки Вінницького національного технічного університету