

А.К. Зильгараева¹, Н.К. Смайлов¹, Ш.А.Мирзакулова², Д.А.Нурпеисова²

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Turan University, Алматы, Казахстан

E-mail: alya_zk@mail.ru

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ФОТОМЕТРИИ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ

Аннотация. Целью исследования являются определения спектральных характеристик, которые зависят в основном от концентрации исследуемого вещества и определяются количеством доминирующих поглощающих компонентов. Однако наличие компонентов приводит к тому, что спектральные линии отдельных компонентов могут перекрываться. Поэтому могут возникнуть сложности при количественном определении концентрации этих компонентов. На спектральные характеристики также влияет структура биологической ткани, которая может варьироваться в зависимости от имеющейся патологии или под влиянием физических факторов. На спектрофотометрических исследованиях базируются современные методы биомедицинской диагностики: лазерная доплеровская флоуметрия, лазерная диффузионная томография, оптическая маммография, когерентная оптическая томография, лазерная флуоресцентная диагностика. Также методы, используемые для определения содержания жиров в тканях и др. Помимо прямой диагностики методы спектрофотометрии довольно часто используются для оценки эффективности низкоинтенсивного лазерного воздействия в режиме реального времени.

Ключевые слова. Спектральные свойства, фотометрия, лазер, эллипсоидальный рефлектор, биологическая ткань, алгоритм моделирования, оптика, интерфейс, метод Монте Карло, программа VT_Mod.

Введение.

Спектрофотометрические исследования базируются на регистрации отраженного или пропущенного излучения, что подверглось взаимодействию с биологической тканью или средой в широком диапазоне длин волн. Результатом исследования является набор спектров пропускания и отражения, по которым определяют коэффициенты отражения и пропускания и рассчитывают оптические параметры исследуемого образца. Для регистрации излучения используют обычно использующие оптические и волоконные системы, фотометрические головки на базе интегрирующей сферы или эллипсоидальных рефлекторов. В зависимости от выбранной оптической схемы могут использоваться те или иные математические модели. Наиболее универсальными при использовании интегрирующей сферы являются методы на основе теории Ми, добавления-помнения, инверсного Монте Карло, реализуемые и доступные для практического использования. При эллипсоидальной рефлектометрии используют инверсный метод Монте Карло с учетом конструктивных параметров эллипсоида вращения. Другие математические методы (поточные модели Кубелки-Мунка, диффузное приближение, метод сферических гармоник и др.) используются для биологических сред с суженным диапазоном оптических свойств.

Материалы и методы.

Методы спектрофотометрии используются в различных отраслях неинвазивной биомедицинской диагностики. Они обладают рядом преимуществ над другими методами (рентгеновскими, электрическими, ультразвуковыми и др.), поскольку низкоинтенсивное лазерное излучение, используемое в данном случае, не оказывает такого воздействия, что может негативно влиять на организм человека или вносить негативный фактор (погрешность) в полученные.

Методы лазерной доплеровской флоуметрии [3] измеряют частотные ритмы и скорость капиллярного тока крови в микроциркулярном русле биологической ткани. В настоящее время основной проблемой при их использовании является плохая устойчивость к отрицательным внешним факторам, поэтому в некоторых странах они находятся на этапе научных экспериментальных исследований [1].

Достаточно перспективны методы лазерной диффузионной томографии (ЛДТ), которые базируются на просвечивании лазерным излучением мягких тканей пациента и с помощью математической обработки позволяют получать изображения структуры ткани и внутренних неоднородностей [1]. Именно на этом методе базируется работа оптических маммографов [4,5]. На данном этапе этот метод также на экспериментальном этапе.

Также перспективным направлением является лазерная флюоресцентная диагностика, которая делится на два больших класса. Первый класс устройств обеспечивает определение природной светимости биологического объекта, а второй – реакцию биологического объекта на введенную дозу флюоресцентного вещества под влиянием низкоинтенсивного лазерного излучения.

Метод фотометрии эллипсоидальными рефлектометрами.

Метод фотометрии эллипсоидальными рефлекторами заключается в регистрации отраженного или пропущенного излучения биологическим объектом, а также позволяет получить пространственное распределение этого излучения. Это обеспечивается конструктивными особенностями зеркального эллипсоидального рефлектора, ортогонально усеченного по фокальным плоскостям таким образом, что нижняя фокальная плоскость находится в контакте с изучаемым образцом биологической среды, а верхняя оптически сопряжена с приемником излучения (рисунок 1.1).

На рисунке 1.1. схематически приведен вариант измерительной системы с одним зеркальным эллипсоидом вращения для исследования отраженного излучения. Другие варианты, в частности, применение двух эллипсоидов для одновременной регистрации отраженного и пропущенного излучения, приведены авторами в работе [3].

Принцип фотометрии эллипсоидальных рефлектометров (ЕР) заключается в следующем. Оптическое излучение, генерируемое лазером, вводится полость эллипсоидального зеркала 1 через входное окно 2 и, отразившись от плоского зеркала 3, направляется на поверхность изучаемой части биологического объекта 4. После взаимодействия излучения с биологическим объектом на поверхности в фокальной плоскости формируется характерное пятно рассеяния, изображение которого проецируется на противоположную фокальную плоскость F2.

Пятно рассеяния по второй фокальной плоскости передается с помощью оптической системы 5 в плоскость фоточувствительной площадки приемника излучения.

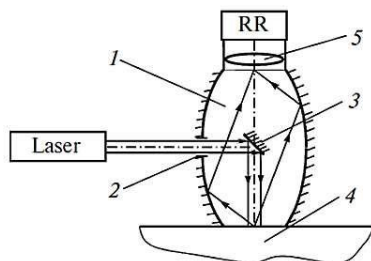


Рисунок 1.1 - Измерительная система с зеркальным эллипсоидом вращения для определения оптических свойств биологических объектов в диффузно-отраженном [8]: 1 – эллипсоидальный рефлектор, 2 – входное окно, 3 -зеркало, 4 – биологический объект, 5 – оптическая система, RR -координатный приемник излучения

Техническая реализация фотометрической установки с использованием эллипсоидальных рефлекторов приведена на рисунке 1.2.

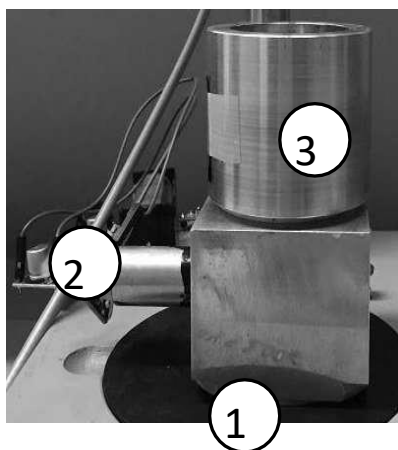


Рисунок 1.2 - Фотометрическая установка для исследования характера рассеяния излучения средами: 1,3 –эллипсоидальный рефлектор, 2 – лазер

Такой вид установки обеспечивает получение информации о рассеянном биологической средой излучении в отраженном и пропущенном направлениях.

Эллипсоидальные рефлекторы в данном случае изготовлены из алюминия Д16Т методом траекторного копирования [8-10]. Внутренняя поверхность эллипсоида имеет высокий класс чистоты, что обеспечивает ее зеркальность. В свою очередь такой материал позволяет проводить исследования в видимом и красном диапазонах излучений.

Результаты.

1. Алгоритм моделирования.

Для моделирования распространения и взаимодействия излучения с биологической средой и эллипсоидальным рефлектором используется программное обеспечение «BT_mod». Работа алгоритма (рисунок 1.3) функционирования программы BT_mod [9,10] базируется на алгоритме прямого метода Монте Карло и конструктивных особенностей эллипсоидального рефлектора (значение эксцентриситета и фокального параметра).

Практическая реализация предлагаемого алгоритма базируется на методах рейтрейсинга и состоит в следующем. Сначала находят точку пересечения луча R_i с

первой фокальной плоскостью F1 верхнего эллипсоида (если $\cos\gamma < 0$) или второй фокальной плоскостью F2 нижнего эллипсоида (если $\cos\gamma > 0$). Фотоны, не попавшие в эти фокальные плоскости, не участвуют в дальнейшем, а их вес записывается в отдельный массив, характеризующий эффективность применения с выбранным фокальным параметром для оптической биометрии исследуемого образца. Далее определяют точку пересечения луча с ЭР. Если координата точки сечения по оси Oz превышает двойное фокальное расстояние эллипсоида, то осуществляют поиск координат точки сечения луча со второй фокальной плоскостью верхнего F2 или нижнего F2 эллипсоида.

В противном случае рейтрейсинг продолжается до тех пор, пока луч не пересечет одну из фокальных плоскостей F2 или F2 пока не будут достигнуты условия параллельности перемещения луча к оси xOy.

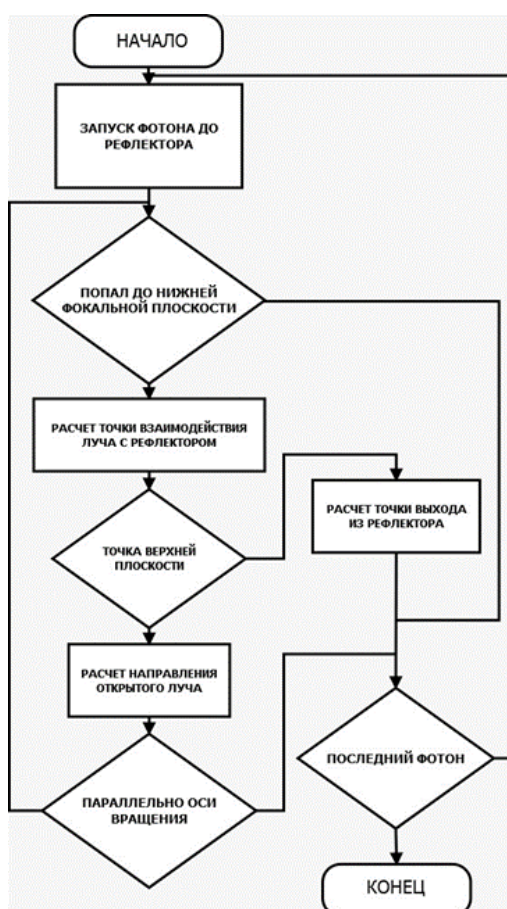


Рисунок 1.3 - Алгоритм метода Монте Карло с использованием эллипсоидального рефлектора

2. Описание работы программного обеспечения.

Для исследования спектральных характеристик биологических сред методом фотометрии с использованием эллипсоидальных рефлекторов использован программный продукт «BT_mod», работающий на основе приведенного на рисунке 1.3 алгоритма. Главное окно программы поделено на девять зон (рисунок 1.4).

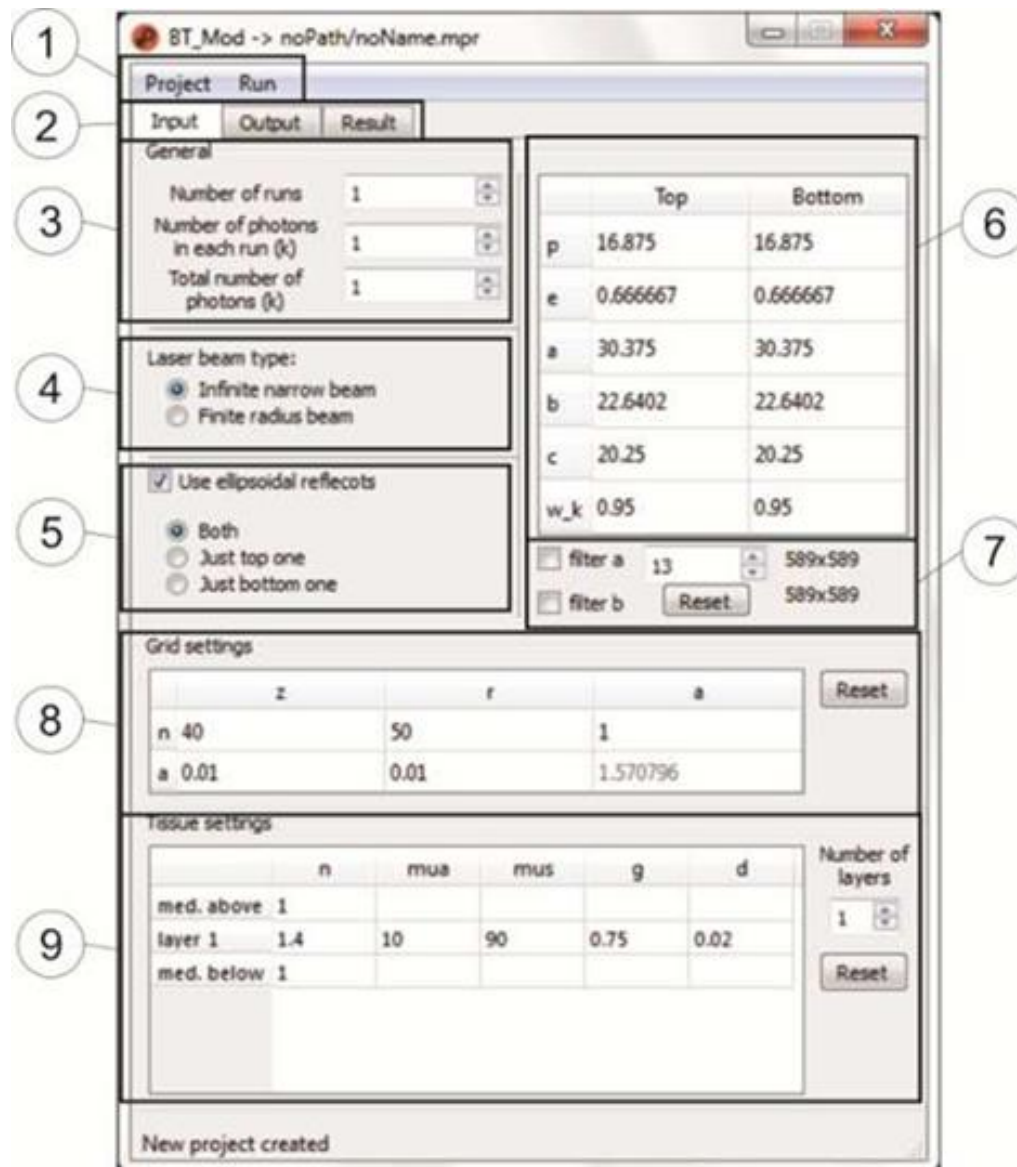


Рисунок 1.4 - Главное окно программы «BT_Mod»: 1 – главное меню, 2 – вкладки входных и исходных данных моделирования, 3 – область управления количеством запусков и количеством фотонов, 4 – область настройки параметров луча излучения, 5 – настройка использования эллипсоидальных рефлекторов, 6 – область настройки параметров использованных рефлекторов, 7 – область настроек получаемых изображений, 8 – область ввода параметров массивов сбора данных, 9 – область настройки параметров исследуемого образца

В зоне 1 выбирают новый проект Project и после ввода всех данных в зоне 2 запускают работу программы кнопкой Run. Зона 2 делится на три окна, отвечающие на ввод данных и получение результатов.

Параметры излучения, а именно его мощность задаются в зоне 3 количеством фотонов и количеством запусков. Несколько запусков выбирается для того, чтобы найти среднее значение результатов. Профиль луча задается в зоне 4 и может быть тонким или определенной формы.

Программа может работать с эллипсоидом, тогда в зоне 5 ставится галочка и без. Выбор конструктивных параметров эллипсоида осуществляется в зоне 6, а изображение – в зоне 7.

Оптические и геометрические параметры биологической среды задаются в зоне 9. При этом можно выбрать необходимое количество слоев с соответствующим набором параметров, которое будет моделировать биологическую среду.

Как результат моделирования получаем коэффициенты излучения (диффузное отражение R, поглощение A и пропуск T) и фотометрические пятна рассеяния в отраженном и пропущенном свете.

3. Метод зонного анализа.

Для анализа и оценки полученных фотометрических изображений пятна рассеяния предложено использование метода зонного анализа, заключающегося в определении освещенности каждого кольца с последующим его сравнением [10].

Для определения освещенности в работе была использована программная среда «Iris», с помощью которой можно определить интенсивность в заданной зоне и разделить ее на количество падающих фотонов для нормирования данных. На основе определенной интенсивности определяется освещенность

$$E = \frac{I_n}{S} = \frac{I_n}{\pi r^2}.$$

Рассмотрим входные данные принцип определения освещенности в каждом кольце.

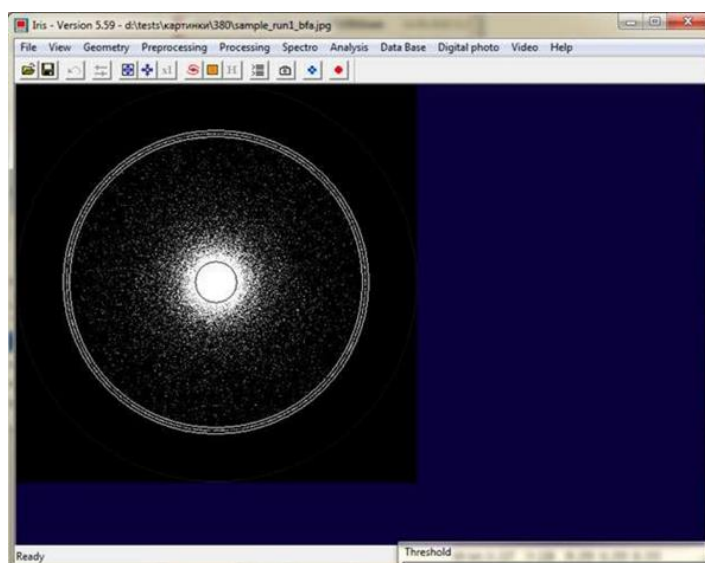


Рисунок 1.5 - Интерфейс программы «Iris» [10]

Входными данными для определения интенсивности являются фотометрические изображения, а также значение радиуса исследуемого участка. Принцип определения интенсивности в каждом кольце можно поделить на следующие этапы:

- определение общей интенсивности I_1 . Для этого необходимо при анализе задать радиус наибольшего кольца r_1 ;
- определение интенсивности I_2 без наружного кольца. Для этого задают радиус r_2 ;
- определение интенсивности в наименьшем кольце I_3 . Для него необходимо задать и подобрать радиус малейшего кольца r_3 ;

- расчет интенсивности наружного кольца $I_3 = I_1 - I_2$;
- расчет интенсивности среднего кольца $I_c = I_2 - I_1$;
- расчет интенсивности внутреннего кольца $I_b = I_3$.

Обсуждение.

Условия проведения модельного эксперимента зависят от конструктивных особенностей эллипсоидального рефлектора, а также от работы программы VT_Mod.

Для приближения модельного опыта к настоящему нужно задать следующие конструктивные характеристики ЭР: $p=16,875$, $e=0,666$. В свою очередь, материал, из которого изготовлен ЭР, позволяет проводить исследования в видимом и красном диапазонах излучений, что ограничивает спектральный диапазон исследований.

Количество падающих фотонов при одном запуске должно составлять не менее 20 млн. для получения фотометрического изображения пятна рассеяния, что будет соответствовать реальному эксперименту. Однако при определении коэффициентов диффузного отражения, пропускания и поглощения достаточно и нескольких тысяч. В этом случае необходимо производить не менее 10 запусков для усреднения значений, выполняемых программой автоматически.

Заключение.

На основе проведенного теоретического анализа спектральных свойств биологических сред и примере модельного эксперимента получены следующие выводы:

- приведены особенности экспериментальных исследований методами эллипсоидальных рефлекторов;
- описан принцип программы VT_Mod, определены входные данные для моделирования и тип результатов, которые необходимо получить;
- рассмотрены особенности работы программной среды Irgis и предложены этапы проведения обработки фотометрических изображений пятна рассеяния;
- определены предпосылки и предложены экспериментальные исследования.

Таким образом, достоверность полученных результатов будет более приемлема при сравнительной оценке оптических параметров, вычисленных в рамках различных математических моделей, что является дальнейшим шагом в исследованиях с использованием эллипсоидальной рефлекторной фотометрической системы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Неинвазивная оптическая и лазерная медицинская диагностика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.medphyslab.org/Cr_r_ond_1.htm
- [2] Рогаткин Д.А. Физические основы оптической оксиметрии / Д.А. Рогаткин // Медицинская физика. – 2012. – №2. – с. 97 – 114.
- [3] Ding H. Non-invasive prediction of hemoglobin levels by principal component and back propagation artificial neural network / H. Ding, Q. Lu, H. Gao, Z. Peng // OSA. – vol.5, no.4. – 2014. – Pp.1145 – 1152.
- [4] Ven S. Diffuse optical tomography of the breast: initial validation in benign cysts / S. Ven [et. el] // Mol Imaging Biol. – 2009. – №11(2). – Pp.64–70.
- [5] В.П. Кожум'яко, Н.І. Заболотна, Б.П. Олійніченко, Оптичні томографи: Проблеми та перспективи застосування в мамології // Біомедичні оптико – електронні системи та прилади- 2009. - С. 153-163.
- [6] Тучин В. В. «Оптическая биомедицинская диагностика» В 2 томах / В. В. Тучин. – Москва: Физмалит, 2007. – 560 с.

[7] Безуглий М.О. Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів / М.О. Безуглий, І.І. Синявський, Н.В. Безугла, А.Г. Козловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2016, №2 (52). – С.76-81.85

[8] 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.

[9] Prah S. A. A Monte Carlo Model of Light Propagation in Tissue / S. A. Prah, 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.

[10] 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.

Әлия Зілғараева, магистр, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, alya_zk@mail.ru

Нұржігіт Смайылов, PhD, профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, nur_aly.kz@mail.ru

Шарафат Мирзакулова, PhD доцент, Тұран университеті, Алматы, Қазақстан, sh.mirsakulova@turan-edu.kz

Динара Нурпеисова, магистр, Тұран университеті, Алматы, Қазақстан, dnurpeisova@bk.ru

ЭЛИПСОИДАЛДЫ ШАҚЫРЫЛЫҚТАРМЕН ФОТОМЕТРИЯДА СПЕКТРАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРДІ АНЫҚТАУ ӘДІСТЕРІ МЕН ҚҰРАЛДАР

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты – негізінен зерттелетін заттың концентрациясына тәуелді және басым сiңiретiн компоненттердiң санымен анықталатын биологиялық орталардың спектрлік сипаттамаларын анықтау. Дегенмен, құрамдас бөлiктердiң болуы жеке құрамдастардың спектрлік сызықтарының қабаттасуы мүмкiн екенiне әкеледi. Сондықтан бұл компоненттердiң концентрациясын сандық түрде анықтау қиын болуы мүмкiн. Спектрлік сипаттамаларға биологиялық құрылымы да әсер етедi, ол бар патологияға байланысты немесе физикалық факторлардың әсерiнен өзгеруi мүмкiн. Биомедициналық диагностиканың заманауи әдiстерi спектрофотометриялық зерттеулерге негiзделген: лазерлік доплерфлоуметрия, лазерлік диффузиялық томография, оптикалық маммография, когеренттi оптикалық томография, лазерлік флуоресценттi диагностика. Сондай-ақ, тiндердегi майлардың құрамын анықтау үшiн қолданылатын әдiстер және т.б. Тiкелей диагностикадан басқа, нақты уақыт режимiнде төмен қарқынды лазер әсерiнiң тиiмдiлiгiн бағалау үшiн спектрофотометриялық әдiстер жиi қолданылады.

Түйiндi сөздер. Спектрлік қасиеттерi, фотометрия, лазер, эллипсоидты рефлектор, биологиялық мата, модельдеу алгоритмi, оптика, интерфейс, Монте-Карло әдiсi, BT_Mod бағдарламасы.

Aliya Zilgarayeva, magister, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, alya_zk@mail.ru

Nurzhigit Smailov, PhD, professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, nur_aly.kz@mail.ru

Sharafat Mirzakulova, PhD, associate professor, Turan University, Almaty, Kazakhstan, Sh.Mirsakulova@turan-edu.kz

Dinara Nurpeisova, magister, senior lectur, Turan University, Almaty, Kazakhstan, dnurpeisova@bk.ru

METHODS AND TOOLS FOR DETERMINING SPECTRAL PROPERTIES FOR PHOTOMETRY WITH ELIPSOID REFLECTORS

Abstract. The aim of the study is to determine the spectral characteristics of biological media, which depend mainly on the concentration of the test substance and are determined by the number of dominant absorbing components. However, the presence of components leads to the fact that the spectral lines of individual components may overlap. Therefore, it may be difficult to quantify the concentration of these components. Spectral characteristics are also affected by the structure of biological tissue, which may vary depending on the existing pathology or under the influence of physical factors. Modern methods of biomedical diagnostics are based on spectrophotometric studies: laser Doppler flowmetry, laser diffusion tomography, optical mammography, coherent optical tomography, laser fluorescence diagnostics. Also, methods used to determine the content of fats in tissues, etc. In addition to direct diagnostics, spectrophotometric methods are quite often used to evaluate the effectiveness of low-intensity laser exposure in real time.

Keywords. Spectral properties, photometry, laser, ellipsoidal reflector, biological tissue, modeling algorithm, optics, interface, Monte Carlo method, BT_Mod program.
