

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202292115 (13) A1

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2023.05.25

(51) Int. Cl. G01N 21/41 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
2022.06.30

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИВЕДЕННОГО РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

(96) 2022/ЕА/0038 (ВУ) 2022.06.30

(72) Изобретатель:

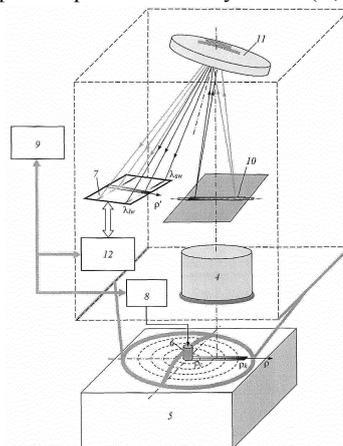
(71) Заявитель:  
БЕЛОРУССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (БГУ) (ВУ)

Фираго Владимир Александрович,  
Шулико Константин Игоревич (ВУ)

(74) Представитель:

Шаклеева Е.В. (ВУ)

(57) Изобретение относится к области спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением и может использоваться в устройствах неразрушающего контроля оптических характеристик рассеивающих мелкодисперсных материалов и сред. Задачей изобретения является повышение точности способа определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  мелкодисперсных материалов и устройства для его осуществления. Сущность изобретения заключается в том, что при определении  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  мелкодисперсных материалов широкополосное световое излучение вводят в малый участок поверхности образца материала, регистрируют нормированный спектрально-пространственный профиль интенсивности диффузно отраженного излучения  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_k)$ , где  $\rho_k$  набор используемых расстояний между точкой ввода излучения и регистрации, и решают систему нелинейных уравнений путем минимизации функции невязки, в состав которой входят варьируемый теоретически рассчитываемый на основе диффузионного приближения нормированный спектрально-пространственный профиль  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_k)$ , деленный на эмпирическую корректирующую функцию, а также варьируемые зависимости  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_k)$ , которые рассчитывают путем интерполяции на неравномерной сетке отсчетов семейства заранее рассчитанных с помощью диффузионного приближения поверхностей  $I_{nv}(\mu^*_s, \mu^*_a, \rho_k)$ , что обеспечивает устойчивость определения искомым спектральных зависимостей  $\mu^*_s(\lambda_i)$  и  $\mu^*_a(\lambda_i)$  при варьировании в процессе минимизации функции невязки всего тремя параметрами. Техническая реализация заявляемого способа осуществляется при помощи устройства, содержащего широкополосный источник светового излучения, вводимого в исследуемый материал, объектив, щель, фокусирующую дифракционную решетку с плоским полем формируемого изображения и коррекцией aberrаций, матрицу фотоприемников с блоком цифровой регистрации изображения, управляющий компьютер, совокупность которых обеспечивает регистрацию спектрально-пространственного профиля отраженного излучения  $I(\lambda_i, \rho_k)$ .



A1

202292115

202292115

A1

## Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения светового излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления

Изобретение относится к области спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением и может использоваться в устройствах неразрушающего контроля оптических характеристик мелкодисперсных рассеивающих материалов. Эти характеристики используют для оценки отклонения свойств и состава контролируемых материалов от заданных или эталонных. Основными оптическими характеристиками мелкодисперсных рассеивающих сред являются спектральный приведенный или редуцированный показатель рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и спектральный показатель поглощения  $\mu_a(\lambda)$ . Из них  $\mu_a(\lambda)$  имеет в основном резонансный характер, т. е.  $\mu_a$  увеличивается в резонансных полосах поглощения молекул рассеивающей среды, которые для конденсированных сред достаточно широкие. Рассеяние же светового излучения определяется неоднородностью среды и зависит от ее микрофизических параметров, в том числе от показателя преломления дисперсионной среды  $n_t$  и показателя преломления нерастворимых включений в нее или дисперсной фазы  $n_{dp}$ . Поэтому размеры включений и отношение  $n_{dp}/n_t$  влияют на интенсивность и спектр рассеяния излучения. При этом спектральный приведенный показатель рассеяния или его спектральная зависимость  $\mu'_s(\lambda)$  обычно растет при уменьшении длины волны  $\lambda$ . Поэтому спектральную зависимость  $\mu'_s$  в основном описывают степенной зависимостью  $\mu'_s(\lambda) \approx a \cdot (\lambda/\lambda_0)^b$ , где  $a$  с размерностью  $\text{см}^{-1}$  определяет значение  $\mu'_s(\lambda_0)$  на длине волны  $\lambda_0$ , а  $b$  – наклон зависимости  $\mu'_s(\lambda)$  [1].

Известны способы [2, 3] вычисления зависимостей коэффициента отражения  $R(\mu'_s, \mu_a, \rho)$  или яркости  $L(\mu'_s, \mu_a, \rho)$  диффузно отраженного излучения полубесконечной рассеивающей средой от приведенного показателя рассеяния  $\mu'_s(\lambda_0)$  и показателя поглощения  $\mu_a(\lambda_0)$  на длине волны  $\lambda_0$ , а также расстояния  $\rho$  между оптоволоконным зондом, через который излучение вводится в среду, и приемным зондом. Их называют диффузионными приближениями. Причем, предполагают, что оси этих оптоволоконных зондов расположены перпендикулярно поверхности исследуемого материала. Для определения искомых значений приведенного показателя рассеяния  $\mu'^*_s(\lambda_0)$  и показателя поглощения  $\mu^*_a(\lambda_0)$  на одной длине волны  $\lambda_0$ , используют способ, основанный на составлении функции невязки  $f[\mu'^*_s(\lambda_0), \mu^*_a(\lambda_0), \rho]$  и применении подгонки рассчитываемых зависимостей  $R[\mu'^*_s(\lambda_0), \mu^*_a(\lambda_0), \rho]$  или  $L[\mu'^*_s(\lambda_0), \mu^*_a(\lambda_0), \rho]$  к экспериментально полученным зависимостям  $R_m(\lambda_0, \rho)$  или  $L_m(\lambda_0, \rho)$  при варьировании значениями  $\mu'^*_s(\lambda_0)$  и  $\mu^*_a(\lambda_0)$  [4, 5]. Подгонку осуществляют путем минимизации функции невязки  $f[\mu'^*_s(\lambda_0), \mu^*_a(\lambda_0), \rho]$  методом наименьших квадратов. В результате минимизации  $f[\mu'^*_s(\lambda_0), \mu^*_a(\lambda_0), \rho]$  определяют искомые значе-

ния приведенного показателя рассеяния  $\mu'^*_s(\lambda_0)$  и показателя поглощения  $\mu^*_a(\lambda_0)$  на длине волны  $\lambda_0$ .

Недостаток этого способа заключается в том, что сложная нелинейная связь между экспериментально получаемыми зависимостями  $L(\lambda_0, \rho_k)$  или  $R(\lambda_0, \rho_k)$  и значениями  $\mu'_s(\lambda_0)$ ,  $\mu_a(\lambda_0)$ , а также влияние состояния поверхности контролируемой рассеивающей среды, может приводить при минимизации функции невязки к неоднозначности получаемых решений  $\mu'^*_s(\lambda_0)$  и  $\mu^*_a(\lambda_0)$ , так как эффективно разделить их влияние на экспериментально получаемые зависимости  $R_m(\lambda_0, \rho)$  или  $L_m(\lambda_0, \rho)$  не удастся [6].

При наличии математической модели, адекватно описывающей оптические характеристики среды, отмеченные выше различия в поведении спектрального приведенного показателя рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и спектрального показателя поглощения  $\mu_a(\lambda)$  позволяют при проведении подгонки параметров модели к экспериментально получаемым спектральным зависимостям  $R_m(\lambda, \rho)$  или  $L_m(\lambda, \rho)$  в широком диапазоне длин волн  $\lambda$  обеспечивать лучшую устойчивость решений, т. е. улучшить точность определения спектральных зависимостей  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$  [7-9]. Причем, для устранения влияния на результаты определения  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$  спектральной чувствительности  $S(\lambda)$  используемой аппаратуры в способе [8] при расчетах вместо экспериментально получаемых зависимостей  $R(\lambda_0, \rho_k)$  используют их нормированный спектрально-пространственный профиль коэффициента диффузного отражения  $r_{nm}(\lambda, \rho_{k,c}) = R(\lambda, \rho_k)/R(\lambda, \rho_c)$ , где  $\rho_c$  – минимальное из используемых расстояний  $\rho_k$ . При выполнении операции нормировки  $R(\lambda, \rho_k)/R(\lambda, \rho_c)$ , спектральная чувствительность аппаратуры  $S(\lambda)$ , которая неявно содержится в виде множителей в числителе и знаменателе отношения, сокращается. Применение этого профиля  $r_{nm}(\lambda, \rho_{k,c})$  позволяет исключить из действий, осуществляемых с экспериментально полученными зависимостями  $R(\lambda, \rho_k)$ , операцию учета спектральной чувствительности применяемой аппаратуры  $S(\lambda)$ , что укорачивает и упрощает последовательность проводимых действий. При проведении операции подгонки теоретические варьируемые зависимости  $r_{nv}[\mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda), \rho_{k,c}]$  могут рассчитывать с помощью моделей диффузионного приближения [2-5] или заранее формировать путем моделирования процессов диффузного отражения излучения рассеивающими средами методом Монте-Карло [8].

Наиболее близким к заявляемому изобретению является способ [9] определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  излучения мелкодисперсными материалами путем ввода широкополосного светового излучения в малый участок поверхности мелкодисперсного материала с известным отношением показателей преломления материала  $n_t$  и среды над ним  $n_m$ , т. е.  $n_{rel} = n_t/n_m$ , измерения интенсивности диффузно отраженного излучения  $I(\lambda, \rho_k)$  при разных расстояниях  $\rho_k$  между точкой ввода излучения и регистрации отраженного излучения, определения зависимости его спектрального коэффициента диффузного отражения  $R_m(\lambda, \rho_k)$  и по-

следующего численного определения искомых спектральных показателей  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$  при решении системы нелинейных уравнений в виде функции невязки, содержащей квадраты разностей измеренных  $R_m(\lambda, \rho_k)$  и теоретических рассчитываемых с помощью диффузионного приближения [2,3,5] зависимостей  $R_v[\mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda), n_{rel}, \rho_k, \alpha_{av}]$ , которую минимизируют методом наименьших квадратов при варьировании усредненным коэффициентом пропорциональности  $\alpha_{av} = R_m(\lambda, \rho_k) / R_v(\lambda, \rho_k)$  и параметрами  $a$  и  $b$  аппроксимации  $\mu'^*_s(\lambda)$  гиперболической функцией вида  $\mu'^*_s(\lambda) = a \cdot \lambda^{-b}$ .

В отличие от способа [4], использующего при определении показателей  $\mu'^*_s$  и  $\mu^*_a$  только узкий участок спектра (например, при использовании в качестве источника излучения лазера с длиной волны генерации  $\lambda_0$ , тогда  $\mu'^*_s = \mu'^*_s(\lambda_0)$ , а  $\mu^*_a = \mu^*_a(\lambda_0)$ ), устойчивость получаемых решений улучшается.

Недостаток этого способа – отсутствие учета влияния состояния поверхности исследуемого образца мелкодисперсного материала на регистрируемые зависимости  $R_m(\lambda, \rho_{k,c})$ , а также снижение вклада в общую сумму квадратов составляющих функции невязки с большими значениями  $\rho_k$ , поскольку зависимости  $R_m(\lambda, \rho_{k,c})$  и  $R_v[\mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda), \rho_k]$  быстро уменьшаются с ростом  $\rho_k$ .

Известно устройство для измерения экспериментальных зависимостей коэффициента отражения  $R(\lambda, \rho)$  или яркости  $L(\lambda, \rho)$  мелкодисперсных материалов или рассеивающих сред, содержащее набор оптоволокон, которые подключают к многоканальному спектрометру [4, 9, 10, 11]. Многоканальные спектрометры используют вогнутые фокусирующие дифракционные решетки с плоским полем формируемого изображения и коррекцией aberrаций типа IV [12, 13], принцип действия которых поясняет фиг. 1. В плоскости изображения, формируемого этой решеткой 2, размещают матрицу фотоприемников 3, что позволяет одновременно получать спектры от нескольких оптоволокон [9], размещаемых вдоль входной щели спектрометра 1, как показано на фиг. 1. По такой схеме выполнен многоканальный спектрометр S200-MF фирмы «СоларЛС» (Республика Беларусь) [14].

Недостатком таких устройств является ограниченное число используемых оптоволокон, а также влияние изгибов оптоволокон, которые неизбежно возникают в процессе подготовки к измерениям и их проведении, на значения спектральных потоков, поступающих на вход используемого спектрометра, что искажает получаемые спектральные зависимости.

Известно устройство для формирования гиперспектрального изображения [15, 16], содержащее объектив, входную щель, на которую объективом фокусируется изображение наблюдаемой поверхности, вогнутую фокусирующую дифракционную решетку с плоским полем формируемого изображения и коррекцией aberrаций, матрицу фотоприемников с системой цифровой обработки получаемых изображений, на светочувствительную область которой дифракционная решетка фокусирует дифрагированные лучи, причем ориентация щели относительно матрицы фотоприемников выбрана так, что спектр формируется вдоль строк размещения светочувствительных элементов матрицы. Ги-

перспектральное изображение формируют путем смещения изображения, создаваемого объективом на входной щели, в направлении перпендикулярном ей. Это смещение обычно реализуют при линейном перемещении гиперспектральной видеокамеры в нужном направлении со скоростью, согласованной с необходимым спектральным разрешением устройства  $r_\lambda$  и требуемым временем экспозиции  $\tau$ , определяемом освещенностью элементов используемой матрицы фотоприемников дифрагированным решеткой излучением.

Недостаток этого устройства при его использовании в спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением – ограниченные функциональные возможности, вследствие отсутствия источника излучения, вводимого в среду, и недостаточного динамического диапазона измеряемых спектральных зависимостей  $L(\lambda, \rho)$ .

Наиболее близким техническим решением к заявляемому устройству является устройство [9], содержащее зонд из 10 оптоволокон, галогенную лампу, излучение которой фокусируют на торец первого оптоволоконного зонда, служащего для освещения мелкодисперсного материала при непосредственном контакте всех торцов оптоволокон одной стороны зонда с поверхностью исследуемого мелкодисперсного материала, многоканальный спектрометр, в плоскости входной щели которого последовательно друг за другом вдоль щели располагают торцы 9 приемных оптоволокон второй стороны зонда, и компьютер, необходимый для управления работой многоканального спектрометра и проведения расчетов на основе использования диффузионного приближения и визуализации получаемых спектральных показателей  $\mu'_{s}(\lambda)$  и  $\mu^*_{a}(\lambda)$ .

Недостатки этого устройства – необходимость перед измерениями с помощью эталонного рассеивающего образца контролировать коэффициенты пропускания излучения каждого приемного оптоволоконного зонда с последующим учетом их влияния на интенсивность регистрируемых сигналов, а также фиксированные значения расстояний  $\rho_k$  между излучающим и приемными зондами.

Задачей изобретения является повышение точности способа определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_{s}(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  мелкодисперсных рассеивающих сред, основанного на регистрации спектральной яркости диффузно отраженного излучения  $L(\lambda, \rho_k)$  на разных расстояниях  $\rho_k$  между точкой ввода зондирующего излучения в среду и точками регистрации, и создание компактного устройства для его осуществления, которое не имеет подвижных механических узлов и не требует использования набора оптоволокон, подключаемых к многоканальному спектрометру.

Сущность изобретения заключается в том, что при определении спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_{s}(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  светового излучения мелкодисперсными материалами используют способ, в котором вводят излучение широкополосного светового источника в малый участок поверхности мелкодисперсного материала с известным отношением показателей преломления материала  $n_i$  и среды над ним  $n_m$ , т. е.  $n_{rel} = n_i/n_m$ , регистрируют зависимости интенсивности  $I(\lambda_i, \rho_k)$  диффузно отраженного излуче-

ния от используемых длин волн  $\lambda_i$  и расстояний  $\rho_k$  между точкой ввода и регистрации, рассчитывают нормированный спектрально-пространственный профиль интенсивности  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) = I(\lambda_i, \rho_k) / I(\lambda_i, \rho_c)$  отраженного излучения, где  $\rho_c$  – минимальное из используемых расстояний  $\rho_k$ , а искомые спектральные зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i)$  и  $\mu^*_a(\lambda_i)$  определяют при решении системы нелинейных уравнений в виде функции невязки

$$f_{I_n}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, m^*_{\text{cor}}] = \sum_{k=2}^{k_h} \left[ \frac{I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]}{I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})} - 1 \right]^2 + \sum_{k=k_b}^{k_h} [\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}) - \langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle]^2, \quad (1)$$

которую минимизируют методом наименьших квадратов, где  $k_h$  – число используемых расстояний  $\rho_k$ ,  $k_b$  – индекс минимального расстояния из набора расстояний  $\rho_k$ , которые используют при расчете разностей искомых спектральных зависимостей  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  и их усредненной по значениям  $\rho_k$  зависимости  $\langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle$ ,  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$  – варьируемый нормированный спектрально-пространственный профиль, который рассчитывают с использованием варьируемой степенной гиперболической зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i) = \mu'^*_s(\lambda_0) \cdot (\lambda_0 / \lambda_i)^{m^*_\lambda}$ , где  $\mu'^*_s(\lambda_0)$  – варьируемое значение показателя приведенного рассеяния при длине волны  $\lambda_0$ ,  $m^*_\lambda$  – варьируемый показатель степени, и диффузионного приближения, с помощью которого рассчитывают зависимость интенсивности диффузно отражаемого излучения от четырех параметров  $I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$ , а варьируемые спектральные зависимости  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  рассчитывают путем интерполяции на неравномерной сетке отсчетов семейства заранее рассчитываемых поверхностей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel}) = I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_k, n_{rel}) / I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_c, n_{rel})$  с учетом текущих значений варьируемой спектральной зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i)$ , причем варьируемую в процессе расчетов нормированную зависимость  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$  и заранее рассчитываемые плоскости  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$  делят на варьируемую корректирующую функцию вида

$$f_{\text{cor}}(m^*_{\text{cor}}, \rho_{k,c}) = 1 + (\Delta\rho_{k,c} / \rho_{k_b})^{m^*_{\text{cor}}} + (2 - m^*_{\text{cor}}) (\Delta\rho_{k,c} / \rho_{k_b}), \quad (2)$$

где  $\Delta\rho_{k,c} = \rho_k - \rho_c$ ,  $m^*_{\text{cor}}$  – варьируемый коэффициент, с помощью подбора которого учитывают влияние состояния поверхности мелкодисперсного материала на интенсивность диффузно отражаемого излучения.

Предлагаемый способ может быть осуществлен с помощью устройства для определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  светового излучения мелкодисперсными материалами, содержащее объектив, широкополосный источник светового излучения с микропроцессорным блоком его управления, которое вводится в материал непосред-

ственно или с помощью оптоволоконного зонда, причем точка ввода излучения расположена в плоскости фокусировки объектива, щель, на которую объективом фокусируется исходное изображение поверхности материала в участке прилегающим к точке ввода излучения в материал, вогнутую фокусирующую дифракционную решетку с плоским полем формируемого изображения и коррекцией aberrаций, матрицу фотоприемников с блоком цифровой регистрации получаемых изображений, на светочувствительную область которой дифракционная решетка фокусирует дифрагированные лучи, причем ориентация щели и дифракционной решетки относительно матрицы фотоприемников выбрана так, что спектр формируется вдоль строк матрицы, управляющий компьютер, который совместно с блоком цифровой регистрации получаемых изображений и микропроцессорным блоком управления широкополосным источником светового излучения осуществляет управление процессом регистрации и передачи семейства получаемых изображений с оптимальным выбором времени экспозиции  $\tau$ , для каждого из кадров с целью обеспечения регистрации пространственной зависимости спектральной интенсивности диффузно отраженного излучения  $I(\lambda_i, \rho)$  в задаваемом диапазоне значений расстояний  $\rho$  от точки ввода излучения в материал до точки регистрации, а также обработку получаемых семейств спектральных зависимостей с оперативным расчетом искомых зависимостей  $\mu'^*_s(\lambda_i)$  и  $\mu^*_a(\lambda_i)$ .

Поставленная цель достигается путем ввода широкополосного излучения в малый участок поверхности исследуемого материала или среды, регистрации спектрально-пространственных зависимостей интенсивности  $I(\lambda_i, \rho_k)$  диффузно отраженного материалом излучения, расчета нормированного спектрально-пространственного профиля интенсивности отраженного излучения  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) = I(\lambda_i, \rho_k) / I(\lambda_i, \rho_c)$  и решения системы нелинейных уравнений в виде функции невязки (1), включающей две суммы. Первая из них содержит отношение варьируемого теоретически рассчитываемого с помощью диффузионного приближения спектрально-пространственного профиля  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}] = I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_{\lambda}, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$ , где  $\mu'^*_s(\lambda) = \mu'^*_s(\lambda_0) \cdot (\lambda_0 / \lambda_i)^{m^*_{\lambda}}$ , к экспериментально определенному профилю  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$ . Для учета влияния состояния поверхности мелкодисперсного материала на получаемые зависимости  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  моделируемую зависимость  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})]$  делят на корректирующую варьируемую функцию  $f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$ . Вторая сумма содержит разности искомых спектральных зависимостей  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  и их усредненной по значениям  $\rho_k$  зависимости  $\langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle$ . Причем, варьируемые спектральные зависимости  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  рассчитывают путем интерполяции на неравномерной сетке отсчетов семейства заранее рассчитанных поверхностей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$  с учетом текущих значений варьируемых спектральных зависимостей  $\mu'^*_s(\lambda_i)$ , которые делят на значения варьируемой корректирующей функции  $f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$ . Техническая реализация заявляемого способа осуществляется при помощи устройства, содержащего источник светового излучения с микропроцессорным блоком его

управления, которое вводится в исследуемый мелкодисперсный материал, объектив, щель, фокусирующую дифракционную решетку с плоским полем формируемого изображения и коррекцией aberrаций, матрицу фотоприемников с блоком цифровой регистрации получаемых изображений, управляющий компьютер, который совместно с блоком цифровой регистрации получаемых изображений и микропроцессорным блоком управления широкополосным источником светового излучения обеспечивает регистрацию интенсивности диффузно отраженного излучения  $I(\lambda_i, \rho)$  в задаваемом диапазоне значений расстояний  $\rho$  от точки ввода излучения в материал до точки регистрации без необходимости применения подвижных оптико-механических узлов или набора оптоволокон с внешним многоканальным спектрометром.

Полезные свойства, появляющиеся у заявляемого технического решения:

- улучшение устойчивости и точности получаемых решений;
- отсутствие подвижных оптико-механических узлов или набора оптоволокон с многоканальным спектрометром, что уменьшает погрешности определения нормированных спектрально-пространственных профилей интенсивности отраженного излучения  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$ .

Отличия заявляемого способа от известных решений:

- учет влияния состояния поверхности исследуемого мелкодисперсного материала на варьируемые в процессе подгонки зависимости  $I_{mv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$  путем деления на значения варьируемой корректирующей функции (2);

- использование в функции невязки (1) квадратичной суммы отношений  $\{I_{mv}[\mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}] / f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})\} / I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) - 1$ , что позволяет с одинаковым весом учитывать при минимизации функции невязки зависимости, полученные для разных значений  $\rho_k$ ;

- дополнение функции невязки (1) суммой квадратов разности искомых спектральных зависимостей  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  и их усредненной по значениям  $\rho_k$  зависимости  $\langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle$ ;

- вычисление варьируемых значений  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  с помощью двумерной интерполяции на неравномерной сетке заранее рассчитанных с использованием диффузионного приближения плоскостей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$ , деленных на текущие значения варьируемой корректирующей функции (2);

Заявляемое устройство содержит следующие признаки, отличные от известных решений:

- обеспечение непосредственного ввода излучения в поверхность исследуемого образца мелкодисперсного материала с помощью широкополосного источника светового излучения, выполненного в виде сверхяркого светодиода с люминесцентным покрытием или галогенной лампы с оптоволоконном, причем светодиод или выходной торец оптоволоконка размещается в плоскости фокусировки объектива;

- применение набора времен экспозиций  $\tau_m$ , обеспечивающего регистрацию гиперспектрального изображения щели в широком диапазоне изменений

интенсивности  $I(\lambda_i, \rho_{k,c})$ , что позволяет проводить необходимую сшивку регистрируемых кадров и получать плавно изменяющиеся нормированные спектрально-пространственные профили  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) = I(\lambda_i, \rho_k) / I(\lambda_i, \rho_c)$  в необходимом диапазоне значений  $\rho$  от  $\rho_{\min}$  до  $\rho_{\max}$ .

Сущность изобретения поясняется фиг. 1–14, где на фиг. 1 приведена схема, иллюстрирующая принцип действия многоканального спектрометра на основе матрицы фотоприемников и вогнутой фокусирующей дифракционной решетки с плоским полем формируемого изображения и коррекцией aberrаций; на фиг. 2 – схема устройства, осуществляющего предложенный способ определения спектральных зависимей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$ ; на фиг. 3 – пример заранее рассчитываемых с использованием моделей диффузионного приближения [2, 3] нормированных плоскостей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel}) = I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_k, n_{rel}) / I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_c, n_{rel})$  при  $\rho_c = \rho_1 = 2.3$  мм; на фиг. 4 – пример четырех экспериментально измеренных нормированных зависимостей  $I_{nm}[\mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda), \rho_{k,c}]$  для образца полиуретана при разных значениях  $\rho_k$  и значении  $\rho_c = 2.3$  мм, где связь между  $\mu'^*_s$  и  $\mu^*_a$  представлена в параметрическом виде с целью иллюстрации, что каждая из полученных зависимостей расположена в пределах своей плоскости значений  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$ ; на фиг. 5 – возможные изменения варьируемой спектральной зависимости  $\mu'_s(\lambda) = \mu'_s(\lambda_0)(\lambda_0/\lambda)^{m^*_\lambda}$  при разных значениях  $m^*_\lambda$  в диапазоне от -0.5 до 4,  $\lambda_0 = 500$  нм и  $\mu'^*_s(\lambda_0) = 50$  см<sup>-1</sup>; на фиг. 6 – траектория минимума среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{f_{i_n}}(\mu'^*_s, \mu^*_a)$  функции невязки (1) при  $\lambda_i = 977.8$  нм,  $f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c}) = 1$  и использовании модели диффузионного приближения [2] для образца полиуретана; на фиг. 7 – траектория минимума среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{f_{i_n}}(\mu'^*_s, \mu^*_a)$  функции невязки (1) для образца белого полистирола при  $\lambda_i = 750$  нм,  $f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c}) = 1$  и использовании модели диффузионного приближения [2], на фиг. 8 – зависимости  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  полученные экспериментально для образца полиуретана при разных положениях объектива слева (жирные сплошные линии) и справа (тонкие сплошные линии черного цвета) от точки ввода излучения в образец, а также подогнанные зависимости  $I_{mv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}] / f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  при двух положениях объектива (штриховые линии) и использовании функции невязки (1); на фиг. 9 – спектральные зависимости  $\mu'^*_s(\lambda)$  (а) и  $\langle \mu^*_a(\lambda) \rangle$  (б) для образца полиуретана, полученные в результате подгонки, где штриховыми линиями представлены спектральные зависимости  $\langle \mu^*_{aR}(\lambda) \rangle$  и  $\langle \mu^*_{aL}(\lambda) \rangle$ , рассчитанные для двух положений объектива; на фиг. 10 – рассчитанные спектральные зависимости произведения  $\mu_{eff}(\lambda) \cdot \rho_k$  для образца полиуретана, иллюстрирующие наличие участков спектра, в которых не выполняются условия применимости моделей диффузионных приближений [2, 3]; на фиг. 11 – зависимости значений корректирующей функции  $f_{cor}$  от приращений расстояния  $\rho_{k,c} = \rho_k - \rho_c$ , полученные в результате подгонки для образца полиуретана при двух положениях (слева  $f_{corL}$  и справа

$f_{\text{corR}}$ ) объектива; на фиг. 12 – зависимости  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  полученные экспериментально для образца белого пищевого полистирола при разных положениях объектива слева (жирные сплошные линии) и справа (тонкие сплошные линии черного цвета) от точки ввода излучения в образец, а также подогнанные зависимости  $I_{nv}[\mu'_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]/f_{\text{cor}}(m^*_{\text{cor}}, \rho_{k,c})$  при двух положениях объектива (штриховые линии) и использовании функции невязки (1); на фиг. 13 – спектральные зависимости  $\mu'_s(\lambda)$  (а) и  $\langle \mu^*_a(\lambda) \rangle$  (б) для образца белого полистирола, полученные в результате подгонки, где штриховыми линиями представлены усредненные зависимости  $\langle \mu^*_{aR}(\lambda) \rangle$  и  $\langle \mu^*_{aL}(\lambda) \rangle$ , рассчитанные для двух положений объектива; на фиг. 14 – зависимости значений корректирующей функции  $f_{\text{cor}}$  от приращений расстояния  $\rho_{k,c} = \rho_k - \rho_c$ , полученные в результате подгонки для образца полистирола при двух положениях (слева  $f_{\text{corL}}$ , справа  $f_{\text{corR}}$ ) объектива.

Устройство для определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$ , функциональная схема которого показана на фиг. 2, имеет объектив 4, который сфокусирован на поверхность мелкодисперсного материала 5. Для ввода светового излучения в малый участок этого материала, расположенный в центре поля зрения объектива, служит широкополосный источник светового излучения. Он может быть выполнен в виде компактного сверхяркого светодиода с люминесцентным покрытием 6 или в виде оптоволоконного источника, выходной торец которого помещается на место светодиода 6, а на второй входной торец которого фокусируется излучение галогенной лампы или сверхяркого светодиода. Для устранения влияния фонового излучения и темновых токов используемой матрицы фотоприемников 7 применяют управление режимом работы (включение/выключение) этого широкополосного источника светового излучения с помощью микропроцессорного блока его управления 8 по командам управляющего компьютера 9. Это позволяет при выключении источника излучения или перекрытии светового потока от галогенной лампы с помощью управляемой шторки регистрировать фоновые сигналы вырабатываемые матрицей фотоприемников 7 и потом вычитать их из сигналов, регистрируемых при вводе светового излучения в рассеивающий материал.

При изотропном рассеянии вокруг точки ввода излучения формируется осесимметричный ореол диффузно отраженного излучения, показанный на фиг. 2 штриховыми изолиниями, интенсивность которого быстро спадает с ростом расстояния  $\rho$ . Объектив 4 формирует изображение этого ореола в плоскости размещения щели 10. Расположение объектива для схемы измерений, показанной на фиг. 2, выбрано таким, чтобы на щель попадало изображение ореола, находящегося справа от точки ввода излучения в материал.

Излучение, прошедшее через щель 10, попадает на вогнутую дифракционную решетку 11 с плоским полем формируемого изображения и коррекцией aberrаций. Дифрагированные этой решеткой пучки излучения формируют на светочувствительной поверхности матрицы фотоприемников 7 гиперспек-

тральное изображение щели. Причем, как показано на фиг. 2, расположение матрицы 7 выбрано таким, чтобы спектр формировался вдоль строк расположения элементов этой матрицы фотоприемников. Параметры дифракционной решетки 11, расстояния от щели 10 до ее центра и от решетки до матрицы фотоприемников 7 выбирают такими, чтобы на светочувствительной поверхности матрицы фотоприемников формировался спектр в заданном диапазоне длин волн от коротковолновой  $\lambda_{sw}$  до длинноволновой  $\lambda_{lw}$  его границ. Для схемы измерений, приведенной на фиг. 2, направление спада интенсивности диффузно отраженного излучения и интенсивности потоков, регистрируемых светочувствительными элементами матрицы 7, наблюдается при возрастании  $\rho$  и  $\rho'$ . Для обеспечения регистрации гиперспектрального изображения щели в большом динамическом диапазоне изменения интенсивности дифрагированных потоков матрица фотоприемников 7 с блоком цифровой регистрации получаемых изображений 12 осуществляет последовательную регистрацию несколько кадров с нарастающим временем экспозиции  $\tau_m$ . Причем, для каждого значения  $\tau_m$  регистрируется и фоновые изображения при выключенном широкополосном источнике светового излучения на основе светодиода 6 или закрытой шторке при использовании оптоволокна и источника на основе галогенной лампы. Значения  $\tau_m$  выбирают таким образом, чтобы обеспечить сшивку кадров и получение результирующего гиперспектрального изображения щели с плавно спадающей зависимостью  $I(\lambda_i, \rho_k)$  в большом динамическом диапазоне значений  $I$ . Получаемые кадры с гиперспектральными изображениями щели и фона пересылаются блоком 12 в управляющий компьютер 9. Там они накапливаются в оперативной памяти компьютера и могут сохраняться в архиве на жестком диске.

При обработке с помощью компьютера  $m_h$  полученных кадров гиперспектральных изображений щели с разными временами экспозиции  $\tau_m$  вычитают фоновые изображения и формируют результирующую спектрально-пространственную плавно спадающую зависимость  $I(\lambda_i, \rho'_k)$ . Потом с учетом масштабного коэффициента  $k_m$ , связывающего расстояния  $\rho$  и  $\rho'$ , т. е.  $\rho = k_m \rho'$ , рассчитывают нормированный спектрально-пространственный профиль интенсивности  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) = I(\lambda_i, \rho_k) / I(\lambda_i, \rho_c)$  отраженного излучения, где  $\rho_c$  – минимальное из используемых расстояний  $\rho_k$ . Значение  $\rho_c$  выбирают из критериев:  $\sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)} \cdot \rho \geq 1$  при использовании приближения [2, 4] или  $\sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)} \cdot \rho \geq 0.1$  для приближения [3]. Эти критерии следуют из условий применимости используемого диффузного приближения, которое в аналитическом виде описывает зависимость коэффициента отражения  $R(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_k, n_{rel})$  или интенсивности  $I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_k, n_{rel})$  диффузно отражаемого излучения образцом материала 5 от трех переменных и отношения  $n_{rel}$  показателей преломления материала  $n_i$  и среды над ним  $n_m$ .

Аналитическое выражение для описания зависимости интенсивности  $I(\rho)$  диффузно отражаемого материалом излучения при использовании модели

диффузионного приближения с одним дипольным источником, содержащим положительный и отрицательный источники излучения [2], имеет вид

$$I(\rho) = \frac{\Phi_S}{16\pi^2 D} \left( \frac{1}{r_1} e^{-\mu_{\text{eff}} r_1} - \frac{1}{r_2} e^{-\mu_{\text{eff}} r_2} \right) + \frac{3\Phi_S}{16\pi^2} \left[ \frac{z_0}{r_1^2} \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_1} \right) e^{-\mu_{\text{eff}} r_1} + \frac{z_0 + 2z_b}{r_2^2} \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_2} \right) e^{-\mu_{\text{eff}} r_2} \right], \quad (3)$$

где  $D = 1/[3(\mu'_s + \mu_a)]$  – оптическая диффузионная длина;  $\Phi_S$  – мощность излучения источника  $b$ ;  $r_1 = \sqrt{\rho^2 + z_0^2}$ ;  $r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z_0 + 2z_b)^2}$ ;  $z_0 = 1/(\mu'_s + \mu_a/3)$ ;  $z_b = 2A \cdot D$ ;  $A = (1 + r_{rh})/(1 - r_{rh})$ ;  $r_{rh} = 0.668 + 0.0636n_{rel} + 0.710/n_{rel} - 1.440/n_{rel}^2$  – коэффициент внутреннего отражения в заднюю полусферу излучения, попадающего на границу раздела из среды, полученный с учетом формул Френеля [5]; а эффективный показатель ослабления излучения средой  $\mu_{\text{eff}}$  определяется выражением  $\mu_{\text{eff}} = \sqrt{\mu_a/D} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}$ .

Недостатки аналитического выражения (3) – занижение значений зависимости  $I(\rho)$  при  $\rho < 1/\mu_{\text{eff}} = 1/\sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}$  и неполный учет влияния коэффициента преломления материала  $n_l$  и состояния его поверхности [5, 17].

Модификация диффузионного приближения (3) путем использования второго вспомогательного дипольного источника [3] позволяет смоделировать более острый пик диффузно отраженного излучения в окрестности точки ввода излучения в ткань. Мощность излучения вспомогательного источника  $\Phi_{S^*}$  определяется мощностью главного источника  $\Phi_S$ , умноженной на два множителя

$$\Phi_{S^*} = \Phi_S e^{-\mu_{\text{eff}}(z_0 + z_0^*)/2} \cdot \eta(g, n), \quad (4)$$

где  $z_0^* = (1 - \eta)(1/\mu'_s)^2/z_0$  – глубина размещения положительного вспомогательного источника, а  $\eta$  – коэффициент пропорциональности для вспомогательного источника

$$\eta(g, \gamma) = \left[ g e^{1-g} \right]^{1/\gamma}, \quad (5)$$

зависящий от фактора анизотропии  $g$  рассеивающего материала и подгоночного параметра  $\gamma$ . Авторы этого приближения [3] протестировали его на ограниченных комбинациях оптических свойств рассеивающей полубесконечной среды и рекомендуют использовать значение  $\gamma = 10$  для расстояний между зондами  $\rho > 0.1/\mu'_s$ . Для изотропно рассеивающих сред фактор анизотропии  $g$  мал, поэтому значение  $\eta$  близко к нулю [3] и приближения [2] и [3] практически совпадают.

Влияние границы раздела между материалом и воздухом учитывается так же, как и в приближении с одним дипольным источником [2] введением экстраполированной границы на высоте  $z_b = 2AD$ . Поэтому второй негативный вспомогательный источник располагается на высоте  $z_0^* + 2z_b$ . Поскольку интенсивность диффузно отражаемого излучения в модифицированной модели

формируется при воздействии двух дипольных источников, она определяется суммой [3]

$$I_{\text{Dual}}(\rho) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{1}{4\pi} [\Psi(\rho) + \Psi^*(\rho)] + \frac{3D}{4\pi} \left[ J_{\left| \hat{z}^- \right.}(\rho) + J^*_{\left| \hat{z}^- \right.}(\rho) \right] \right\}, \quad (6)$$

где

$$\Psi(\rho) + \Psi^*(\rho) = \frac{\Phi_S}{4\pi D} \left[ \frac{e^{-\mu_{\text{eff}} r_1}}{r_1} - \frac{e^{-\mu_{\text{eff}} r_2}}{r_2} \right] + \frac{\Phi_{S^*}}{4\pi D} \left[ \frac{e^{-\mu_{\text{eff}} r_1^*}}{r_1^*} - \frac{e^{-\mu_{\text{eff}} r_2^*}}{r_2^*} \right], \quad (7)$$

$$J_{\left| \hat{z}^- \right.}(\rho) = \frac{\Phi_S}{4\pi D} \left[ \frac{z_0}{r_1^2} \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_1} \right) e^{-\mu_{\text{eff}} r_1} + \frac{z_0 + 2z_b}{r_2^2} \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_2} \right) e^{-\mu_{\text{eff}} r_2} \right], \quad (8)$$

$$J^*_{\left| \hat{z}^- \right.}(\rho) = \frac{\Phi_{S^*}}{4\pi D} \left[ \frac{z_0^*}{(r_1^*)^2} \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_1^*} \right) e^{-\mu_{\text{eff}} r_1^*} + \frac{z_0^* + 2z_b}{(r_2^*)^2} \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_2^*} \right) e^{-\mu_{\text{eff}} r_2^*} \right], \quad (9)$$

$$r_1^* = \sqrt{\rho^2 + (z_0)^2} \quad \text{и} \quad r_2^* = \sqrt{\rho^2 + (z_0^* + 2z_b)^2}.$$

Для формирования функции невязки (1) при используемом наборе значений  $\rho_k$  заранее рассчитывают поверхности  $I_r(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_k, n_{\text{rel}})$  на заданной сетке значений  $\mu'^*_s$  и  $\mu^*_a$ , которые необходимы для создания нормированных плоскостей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{\text{rel}}) = I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_k, n_{\text{rel}}) / I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_c, n_{\text{rel}})$ , используемых при вычислении теоретического нормированного спектрально-пространственного профиля  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_{\lambda}, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{\text{rel}}]$ , варьируемого в процессе минимизации (1). Пример трехмерного изображения четырех рассчитанных плоскостей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c})$  приведен на фиг. 3. Монотонное изменение и отсутствие пересечения плоскостей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{\text{rel}})$  значительно упрощает процесс подбора значений  $\mu^*_a$  и  $\mu'^*_s$  при подгонке параметров используемой модели диффузного приближения. Действительно, каждой точке плоскости  $\mu^*_a, \mu'^*_s$  будут соответствовать свои значения  $I_{nr}(\mu^*_a, \mu'^*_s, \rho_{k,c})$ , как показано на фиг. 3. Это указывает, что при выполнении диффузионного приближения, каждая из получаемых при измерениях зависимостей  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) = I_{nm}[\mu_a(\lambda_i), \mu'_s(\lambda_i), \rho_{k,c}, n_{\text{rel}}]$ , при параметрическом представлении  $\mu'^*_s(\mu_a)$  будет в виде линии лежать в пределах соответствующей плоскости со значением  $\rho_k$ , что иллюстрирует фиг. 4. Причем, влияние спектральной чувствительности  $S(\lambda)$  применяемой аппаратуры на результаты подгонки нормированных варьируемых зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  к экспериментально измеряемым  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$ , как уже указывалось выше, исключается.

Для вычисления варьируемых спектрально-пространственных зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})$ , входящих в (1), используют различие в поведении спектральных зависимостей  $\mu'_s(\lambda_i)$  и  $\mu_a(\lambda_i)$ . Значения  $\mu'_s(\lambda_i)$  обычно плавно возрастают

при уменьшении длины волны, а  $\mu_a(\lambda_i)$  увеличивается в основном в полосах поглощения молекул, входящих в состав исследуемого мелкодисперсного материала, т. е.  $\mu_a(\lambda_i)$  имеет резонансный характер. Поэтому при формировании варьируемой спектральной зависимости  $\mu'_s(\lambda_i)$  используют гиперболическую степенную зависимость

$$\mu_s^*(\lambda_i) = \mu_s^*(\lambda_0) \cdot (\lambda_0/\lambda_i)^{m_\lambda^*}, \quad (10)$$

где  $\mu_s^*(\lambda_0)$  – варьируемое значение показателя приведенного рассеяния при длине волны  $\lambda_0$ , а  $m_\lambda^*$  – варьируемый показатель степени гиперболы  $\lambda_0/\lambda_i$ . Как видно из фиг. 5, выражение (10), зависящее от трех параметров, достаточно гибко описывает возможные спектральные зависимости  $\mu_s^*(\lambda_i)$ .

Варьируемые спектральные зависимости  $\mu_a^*(\lambda_i, \rho_{k,c})$  при задаваемых в процессе подгонки параметрах зависимости  $\mu'_s(\lambda_i)$  рассчитывают, используя параметрическую связь  $\mu_a^*(\mu'_s, \rho_{k,c}) = F[\mu'_s, I_{nm}(\mu'_s, \rho_{k,c})]$ , путем двумерной интерполяции на неравномерной сетке отсчетов семейства заранее рассчитанных плоскостей  $I_{nv}(\mu'_s, \mu_a^*, \rho_{k,c}, n_{rel}) = I(\mu'_s, \mu_a^*, \rho_{k,c}, n_{rel})/I(\mu'_s, \mu_a^*, \rho_{k,c}, n_{rel})$  с учетом текущих значений варьируемой спектральной зависимости  $\mu'_s(\lambda_i)$  и корректирующей функции  $f_{cor}(m_{cor}^*, \rho_{k,c})$ . Правомерность такого подхода подтверждают зависимости на фиг. 3 и фиг. 4. Действительно, как видно из зависимостей на фиг. 3, по заданным значениям  $\mu'_s(\lambda_i, \rho_{k,c})$ ,  $\rho_{k,c}$  и экспериментально измеренным значениям  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$ , можно при выполнении диффузионного приближения определить соответствующие значения  $\mu_a^*(\lambda_i, \rho_{k,c})$ . Это позволяет рассчитывать семейство варьируемых нормированных спектральных зависимостей  $I_{nv}[\mu'_s(\lambda_0), m_\lambda^*, \mu_a^*(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$ , которые используют при минимизации функции невязки (1).

Поскольку существующие диффузионные приближения [2, 3] не в полной мере учитывают показатель преломления исследуемого мелкодисперсного материала  $n_i$ , а также влияние состояния его поверхности на результаты подгонки [5, 17], варьируемую в процессе расчетов нормированную зависимость  $I_{nv}[\mu'_s(\lambda_0), m_\lambda^*, \mu_a^*(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$  делят на эмпирическую варьируемую корректирующую функцию (2)  $f_{cor}(m_{cor}^*, \rho_{k,c}) = 1 + (\Delta\rho_{k,c}/\rho_{k,h})^{m_{cor}^*} + (2 - m_{cor}^*)(\Delta\rho_{k,c}/\rho_{k,h})$ , где  $m_{cor}^*$  – варьируемый корректирующий коэффициент, с помощью которого обеспечивают максимально возможное совпадение в процессе подгонки семейства варьируемых расчетных зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  с экспериментально полученным семейством  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$ . Выбор такой формы эмпирической корректирующей функции основан на анализе отклонений семейства подогнанных при минимизации (1) зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  без учета  $f_{cor}(m_{cor}^*, \rho_{k,c})$ , т. е. когда  $f_{cor}(m_{cor}^*, \rho_{k,c}) = 1$ , от экспериментально полученных  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  для ряда мелкодисперсных материалов. Получаемые значения корректирующей функции отличаются от единицы не более чем на 10 %, что соответствует существующим оценкам относительных погрешностей определения  $\mu'_s$  и  $\mu_a$  с помощью диффузионного приближения [4, 5, 17].

Поскольку значения спектрально-пространственные профилией  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  и  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$  быстро падают при увеличении  $\rho_k$ , при составлении функции невязки в первой сумме (1) используют их отношение, из которого вычитается единица,

$$S_1[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, m^*_{cor}] = \sum_{k=2}^{k_h} \left[ \frac{I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})}{I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})} - 1 \right]^2. \quad (11)$$

Это позволяет с одинаковым весом учитывать в функции невязки зависимости, полученные для разных значений  $\rho_k$ .

Как видно из поведения траектории минимума среднеквадратичного отклонения (СКО) для первой суммы (11) функции невязки (1), приведенной на фиг. 6 для полиуретана при  $f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c}) = 1$ , наблюдается монотонное падение СКО невязки при уменьшении  $\mu^*_a$  вплоть до точки глобального минимума СКО, показанного маркером в виде кружка. Выявлено, что по мере роста среднего по спектру значения приведенного показателя рассеяния  $\mu'^*_s$  мелкодисперсного материала спад СКО для первой суммы функции невязки (11) становится более пологим и начинает наблюдаться отсутствие глобального минимума, что иллюстрирует зависимость на фиг. 7 для образца белого полистирола. Это еще раз подтверждает, что модели [2, 3] диффузионного приближения не полностью учитывают механизмы процессов подповерхностного переноса излучения в мелкодисперсных средах.

Поэтому функцию невязки (1) предложено дополнять второй квадратичной суммой разностей искомым спектральных зависимостей  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  и их усредненной по значениям  $\rho_k$  зависимости  $\langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle$

$$S_2[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, m^*_{cor}] = \sum_{k=k_b}^{k_h} \left[ \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}) - \langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle \right]^2. \quad (12)$$

При вычислении варьируемых спектральных зависимостей  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$ , входящих в (1) и (12) используют интерполяцию на неравномерной сетке плоскостей нормированных расчетных значений  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$ , которые делят на варьируемые значения корректирующей функции  $f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$ , что позволяет при варьировании значения  $m^*_{cor}$  дополнительно учесть как влияние процессов подповерхностного переноса излучения, так и отклонения от диффузионного приближения, вызываемые нарушением условий его применимости:  $\sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)} \cdot \rho \geq 1$  при использовании приближения [2] или  $\sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)} \cdot \rho \geq 0.1$  для приближения [3]. Введение в функцию невязки (1) второй суммы (12) обеспечивает выявление глобального минимума СКО функции невязки, поскольку рассчитываемые в процессе подгонки спектральной зависимости  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  будут сближаться друг с другом, что приведет к формированию своего минимум СКО квадратичной суммы (12) и, следовательно, к возникновению глобального минимума функции невязки (1).

Результаты минимизации (1), т. е. подгонки расчетных варьируемых за-

всисимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c}) = I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}, n_{rel})]/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  к экспериментальным зависимостям  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  для образца полиуретана в широком участке спектра, приведены на фиг. 8, а полученные при этом спектральные зависимости  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$  – на фиг. 9. Вследствие хаотичной ориентации частиц дисперсной фазы используемого образца полиуретана логично полагать, что процессы рассеяния вводимого в него излучения, носят изотропный характер, т. е. фактор анизотропии  $g \approx 0$ . При этом результаты расчетов при использовании моделей диффузионного приближения [2, 3] совпадают. Формируя произведение  $\mu_{eff}(\lambda) \cdot \rho_k = \sqrt{3\mu^*_a(\lambda)[\mu^*_a(\lambda) + \mu'^*_s(\lambda)]} \cdot \rho_k$  можно приблизительно выявить участки спектра, в которых условия применимости диффузионного приближения нарушаются. Для используемого образца полиуретана на фиг. 10 приведены полученные в результате подгонки зависимости  $\mu_{eff}(\lambda) \cdot \rho_k$ , показывающие, что в участке спектра примерно от 500 нм до 900 нм условия применимости диффузионного приближения нарушены.

Неплохое сближение подогнанных зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  и полученных экспериментально  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  при таких условиях обеспечивается корректирующей функцией, вид которой для образца полиуретана показан на фиг. 11. Внимательно анализируя зависимости на фиг. 8 можно убедиться, что некоторое отклонение подогнанных зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  от экспериментально измеренных  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$  наблюдаются в участке спектра, где условия применимости диффузионного приближения нарушены. Корректирующая функция в таких случаях уменьшает вогнутость результирующих зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  вдоль координаты  $\rho$ , поскольку коэффициент  $m^*_{cor} = 1.07$  оказался больше единицы.

Как уже отмечалось выше, при увеличении среднего по спектру значения приведенного показателя рассеяния  $\mu'^*_s$  материала крутизна спада СКО для первой суммы функции невязки (1) падает, что будет снижать точность определения искомым спектральных зависимостей  $\mu'^*_s(\lambda_i)$  и  $\mu^*_a(\lambda_i)$ . Зависимости, приведенные на фиг. 12-13, показывают, что, несмотря на выполнение условий применимости диффузионного приближения и неплохое совпадение подогнанных зависимостей  $I_{nv}(\lambda_i, \rho_{k,c})/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  с экспериментально полученными  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})$ , усредненные спектральные зависимости  $\langle \mu^*_{aR}(\lambda) \rangle$  и  $\langle \mu^*_{aL}(\lambda) \rangle$  для образца белого полистирола, полученные при регистрации ореола отраженного излучения справа и слева от точки ввода излучения в полистирол и представленные на фиг. 13,б, имеют смещение относительно друг друга. Причина этого смещения – малая крутизна спада СКО первой суммы в (1).

Поскольку условие применимости диффузионного приближения для образца полистирола соблюдается, полученная корректирующая функция  $f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  с коэффициентом  $m^*_{cor} = 0.812 < 1$ , вид которой представлен на фиг. 14, увеличивает вогнутость результирующих зависимостей  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}, n_{rel})]/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})$  вдоль координаты  $\rho$ , учитывая таким образом влияние показателя преломления полистирола  $n_i$  и состояния его по-

верхности на процессы подповерхностного переноса излучения.

Приведенные примеры для двух образцов материалов с разной удельной плотностью дисперсной фазы и, следовательно, усредненных по спектру приведенных показателей рассеяния  $\mu'_s$  иллюстрируют, что предложенные решения позволяют достичь поставленных в изобретении целей.

Таким образом, предлагаемые способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления позволяют за счет использования широкополосного источника светового излучения, вводимого в образец, регистрации нормированного спектрально-пространственного профиля интенсивности  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) = I(\lambda_i, \rho_k) / I(\lambda_i, \rho_c)$  отраженного излучения, решения системы нелинейных уравнений путем минимизации функции невязки в виде (1), в состав которой входит варьируемый спектрально-пространственный профиль  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$ , деленный на корректирующую функцию (2), а также варьируемые спектральные зависимости  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$ , рассчитываемые путем интерполяции на неравномерной сетке отсчетов семейства заранее рассчитанных с помощью диффузионного приближения поверхностей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}) = I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_k, n_{rel}) / I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_c, n_{rel})$  с учетом текущих значений варьируемой зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i)$  и текущих значений корректирующей функции (2), повысить устойчивость определения искомым спектральных зависимостей  $\mu'^*_s(\lambda_i)$  и  $\mu^*_a(\lambda_i)$  при варьировании в процессе минимизации (1) всего тремя параметрами  $\mu'^*_s(\lambda_0)$ ,  $m^*_\lambda$  и  $m^*_{cor}$ .

Определенные при минимизации (1) спектральные зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i)$  и  $\mu^*_a(\lambda_i)$  далее можно использовать как для оперативной проверки отклонения контролируемых параметров и характеристик исследуемого мелкодисперсного материала, в частности  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$ , от аналогичных свойств эталонного образца, так и оперативного определения концентрации оптически активных компонент, входящих в состав этого материала. Определение концентрации компонент осуществляют путем решения обратной спектрометрической задачи по определению состава многокомпонентных сред по измеренной или определенной экспериментально в широком участке спектра суммарной спектральной зависимости показателя поглощения от длины волны

$$\mu_{a\Sigma}(\lambda) = \sum_{m=1}^{m_h} c_m \mu_{am}(\lambda),$$

где  $c_m$  – неизвестные значения концентраций  $m$ -ных компонент исследуемого образца материала,  $\mu_{am}(\lambda)$  – заранее известные спектральные показатели поглощения светового излучения оптически активными  $m$ -ными компонентами материала.

Предлагаемый способ и устройство является основой для развития перспективного направления – спектроскопии диффузного рассеяния с пространственным разрешением для оперативного контроля оптических свойств и компонентного состава различных мелкодисперсных материалов и веществ.

Широкое применение это направление найдет при оперативном контроле свойств ряда пищевых продуктов (молоко, сыры, масло, фрукты, овощи, корнеплоды и т. д.), а также при исследованиях изменений свойств этих продуктов в процессе вызревания и хранения. Описанный способ и устройство имеет перспективы широкого применения и в медицине при контроле состояния микроциркуляторного русла кровеносной системы человека (контроль процессов доставки и потребления кислорода тканями на основе определения средней оксигенации крови в капиллярах и венулах) и гидратации тканей, что важно при лечении их отеков и возрастных изменений, а также при контроле процессов восстановления тканей при лечении травм, ранений и ожогов.

Совокупность предлагаемых решений позволяет улучшить устойчивость определения искомым спектральных показателей по сравнению с известными способами и упростить конструкцию устройства для его осуществления за счет исключения подвижных оптико-механических узлов или набора оптоволокон, подключаемых к многоканальному спектрометру.

#### Источники информации:

1. Kanick S. et al. Characterization of Mediastinal Lymph Node Physiology In Vivo by Optical Spectroscopy during Endoscopic Ultrasound-Guided Fine Needle Aspiration // *J. Thorac Oncol.* 2010, Vol. 5, № 7. P. 981-987. doi: 10.1097/jto.0b013e3181ddbc0e.
2. Farrell T. J., Patterson M. S., Wilson B. C. A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo // *Med. Phys.* 1992. V. 19. P. 881–888.
3. Piao D., Patel S. Simple empirical master–slave dual-source configuration within the diffusion approximation enhances modeling of spatially resolved diffuse reflectance at short-path and with low scattering from a semi-infinite homogeneous medium // *Applied Optics*, 2017, Vol. 56, No. 5. P. 1447-1452.
4. Farrell T. J., Patterson M. S. Experimental verification of the effect of refractive index mismatch on the light fluence in a turbid medium // *J. Biomed. Opt.* 2001. V. 6, № 4. P. 468–473.
5. Jacques S. Video reflectometry to specify optical properties of tissue in vivo / *Proc. SPIE 10311, Medical Optical Tomography: Functional Imaging and Monitoring*, (5 August 1993). P. 103110D-1-103110D-16; doi: 10.1117/12.2283758
6. Gunther J., Lu H., Andersson-Engels S. Combination of diffuse reflectance and transmittance spectroscopy to obtain optical properties of liquid phantoms // *Opt. Eng.* 59(2), 024109 (2020), doi: 10.1117/1.OE.59.2.024109
7. Kienle, A. Spatially resolved absolute diffuse reflectance measurements for noninvasive determination of the optical scattering and absorption coefficients of biological tissue / Kienle, L. Lilge, M.S. Patterson. R. Hibst, R. Steiner, B.C. Wilson // *Appl. Opt.* - 1996. - Vol.35, №.15. P.2304-2314.
8. Патент RU 2510506 C2, МПК G01N 33/483 (2006.01), G01N 21/01 (2006.01); 27.03.2014.
9. Doornbos R., Lang R., Aalders M., Cross F., Sterenborg H. The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy // *Physics in Medicine and Biology*. 1999, Vol. 44, № 4. P. 967- 981.
10. Thueler P., Charvet I., Bevilacqua F., Ghislain M. et al. In vivo endoscopic tissue diagnostics based on spectroscopic absorption, scattering, and phase function properties // *Journal of Biomedical Optics*. 2003, Vol. 8, № 3. P. 495-503.
11. Cappon D., Farrel T., Fang Q., Hayward J. Fiber-optic probe design and optical property recovery algorithm for optical biopsy of brain tissue // *Journal of Biomedical Optics*. 2013, Vol. 18, № 10. P. 107004-1 – 107004-10.
12. Scientific diffraction gratings / Custom gratings. Flat field & imaging gratings - Type IV. HORIBA Jobin Yvon.

[https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Gratings/Flat\\_field\\_and\\_imaging\\_gratings\\_Type\\_IV.pdf](https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Gratings/Flat_field_and_imaging_gratings_Type_IV.pdf)

дата доступа 22.02.2022

13. Diffraction Gratings. Advanced technologies for the production of master and replica diffraction gratings. Innovations in optical design. HORIBA GROUP. 20 P. [www.jobinyvon.com](http://www.jobinyvon.com)

<https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Gratings/inovations.pdf>

дата доступа 22.02.2022

14. Спектрометр S200-MF. Solarlaser.

<https://solarlaser.com/devices/s200-mf-imaging-spectrometer/>

дата доступа 22.02.2022

15. <https://analytik.co.uk/hyperspectral-imaging/>

дата доступа 22.02.2022

16. Hyperspec MV.X. The Future of Food.

[https://analytik.co.uk/wp-content/uploads/2021/01/analytik\\_hyperspec-mv.x-brochure-datasheet.pdf](https://analytik.co.uk/wp-content/uploads/2021/01/analytik_hyperspec-mv.x-brochure-datasheet.pdf)

дата доступа 22.02.2022

17. Jacques S. L. "Simple theory and rules of thumb for dosimetry during therapy. Proc. SPIE Proceedings, Photodynamic Therapy. 1989. 1065. P. 100-108.

## Формула изобретения

1. Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  светового излучения мелкодисперсными материалами, в котором вводят излучение широкополосного светового источника в малый участок поверхности мелкодисперсного материала с известным отношением показателей преломления материала  $n_l$  и среды над ним  $n_m$ , т. е.  $n_{rel} = n_l/n_m$ , регистрируют зависимости интенсивности  $I(\lambda_i, \rho_k)$  диффузно отраженного излучения от используемых длин волн  $\lambda_i$  и расстояний  $\rho_k$  между точкой ввода и регистрации, рассчитывают нормированный спектрально-пространственный профиль интенсивности  $I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c}) = I(\lambda_i, \rho_k)/I(\lambda_i, \rho_c)$  отраженного излучения, где  $\rho_c$  – минимальное из используемых расстояний  $\rho_k$ , а искомые зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i)$  и  $\mu^*_a(\lambda_i)$  определяют при решении системы нелинейных уравнений в виде функции невязки

$$f_{I_n}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, m^*_{cor}] = \sum_{k=2}^{k_h} \left[ \frac{I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]/f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c})}{I_{nm}(\lambda_i, \rho_{k,c})} - 1 \right]^2 + \sum_{k=k_b}^{k_h} [\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}) - \langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle]^2, \quad (1)$$

которую минимизируют методом наименьших квадратов, где  $k_h$  – число используемых расстояний  $\rho_k$ ,  $k_b$  – индекс минимального расстояния из набора расстояний  $\rho_k$ , которые используют при расчете разностей искомых зависимостей  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  и их усредненной по значениям  $\rho_k$  зависимости  $\langle \mu^*_a(\lambda_i) \rangle$ ,  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$  – варьируемый нормированный спектрально-пространственный профиль, который рассчитывают с использованием варьируемой степенной гиперболической зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i) = \mu'^*_s(\lambda_0) \cdot (\lambda_0/\lambda_i)^{m^*_\lambda}$ , где  $\mu'^*_s(\lambda_0)$  – варьируемое значение спектрального показателя приведенного рассеяния при длине волны  $\lambda_0$ ,  $m^*_\lambda$  – варьируемый показатель степени, и диффузионного приближения, с помощью которого рассчитывают зависимость интенсивности диффузно отражаемого излучения от четырех параметров  $I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$ , а варьируемые зависимости  $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c})$  рассчитывают путем интерполяции на неравномерной сетке отсчетов заранее рассчитываемых поверхностей  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel}) = I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})/I(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_c, n_{rel})$  с учетом текущих значений варьируемой зависимости  $\mu'^*_s(\lambda_i)$ , причем варьируемую в процессе расчетов нормированную зависимость  $I_{nv}[\mu'^*_s(\lambda_0), m^*_\lambda, \mu^*_a(\lambda_i, \rho_{k,c}), n_{rel}]$  и заранее рассчитываемые плоскости  $I_{nr}(\mu'^*_s, \mu^*_a, \rho_{k,c}, n_{rel})$  делят на варьируемую корректирующую функцию вида

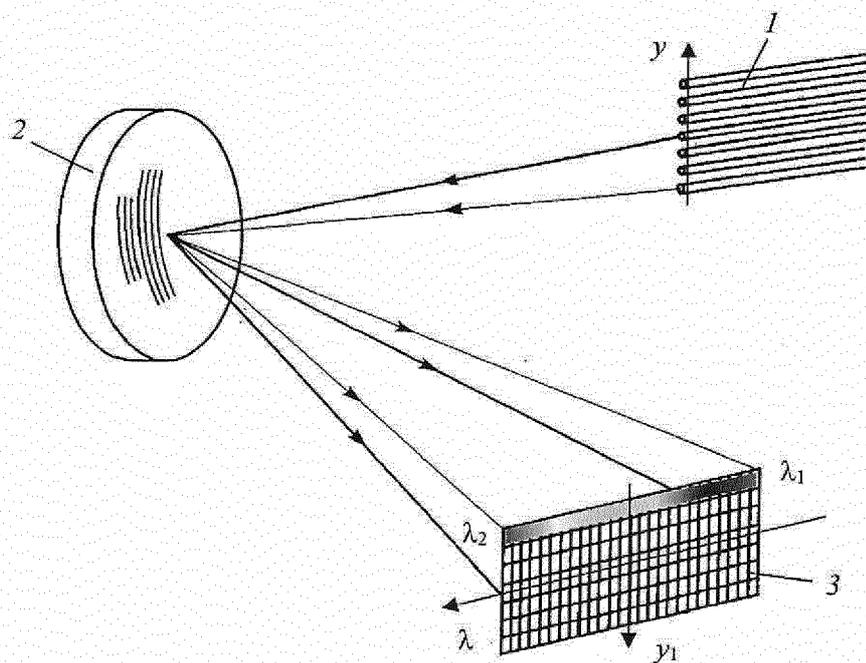
$$f_{cor}(m^*_{cor}, \rho_{k,c}) = 1 + (\Delta\rho_{k,c}/\rho_{k_b})^{m^*_{cor}} + (2 - m^*_{cor})(\Delta\rho_{k,c}/\rho_{k_b}), \quad (2)$$

где  $\Delta\rho_{k,c} = \rho_k - \rho_c$ ,  $m^*_{cor}$  – варьируемый коэффициент, с помощью подбора которого учитывают влияние состояния поверхности мелкодисперсного материала

ла на интенсивность диффузно отражаемого излучения.

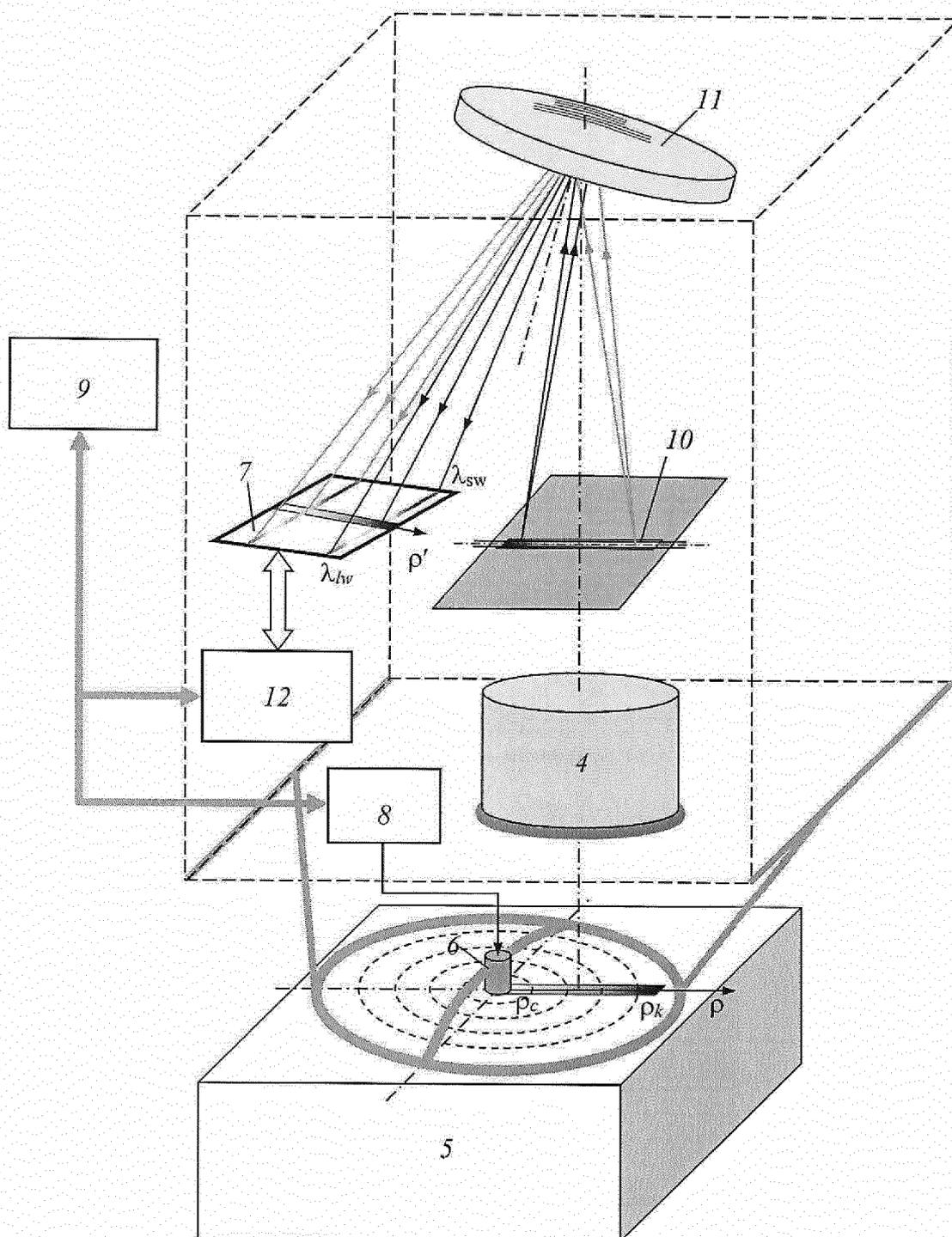
2. Устройство для определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  светового излучения мелкодисперсными материалами, содержащее объектив, широкополосный источник светового излучения с микропроцессорным блоком его управления, которое вводится в материал непосредственно или с помощью оптоволоконного зонда, причем точка ввода излучения расположена в плоскости фокусировки объектива, щель, на которую объективом фокусируется исходное изображение поверхности мелкодисперсного материала в участке прилегающим к точке ввода излучения в материал, вогнутую фокусирующую дифракционную решетку с плоским полем формируемого изображения и коррекцией аберраций, матрицу фотоприемников с блоком цифровой регистрации получаемых изображений, на светочувствительную область которой дифракционная решетка фокусирует дифрагированные лучи, причем ориентация щели и дифракционной решетки относительно матрицы фотоприемников выбрана так, что спектр формируется вдоль строк матрицы, управляющий компьютер, который совместно с блоком цифровой регистрации получаемых изображений и микропроцессорным блоком управления широкополосным источником светового излучения осуществляет управление процессом регистрации и передачи семейства получаемых изображений с оптимальным выбором времени экспозиции  $\tau$ , для каждого из кадров с целью обеспечения регистрации пространственной зависимости спектральной интенсивности диффузно отраженного излучения  $I(\lambda_i, \rho)$  в задаваемом диапазоне значений расстояний  $\rho$  от точки ввода излучения в материал до точки регистрации, а также обработку получаемых семейств спектральных зависимостей с оперативным расчетом искомым зависимостей  $\mu'_s(\lambda_i)$  и  $\mu_a(\lambda_i)$ .

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния  
и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и  
устройство для его осуществления



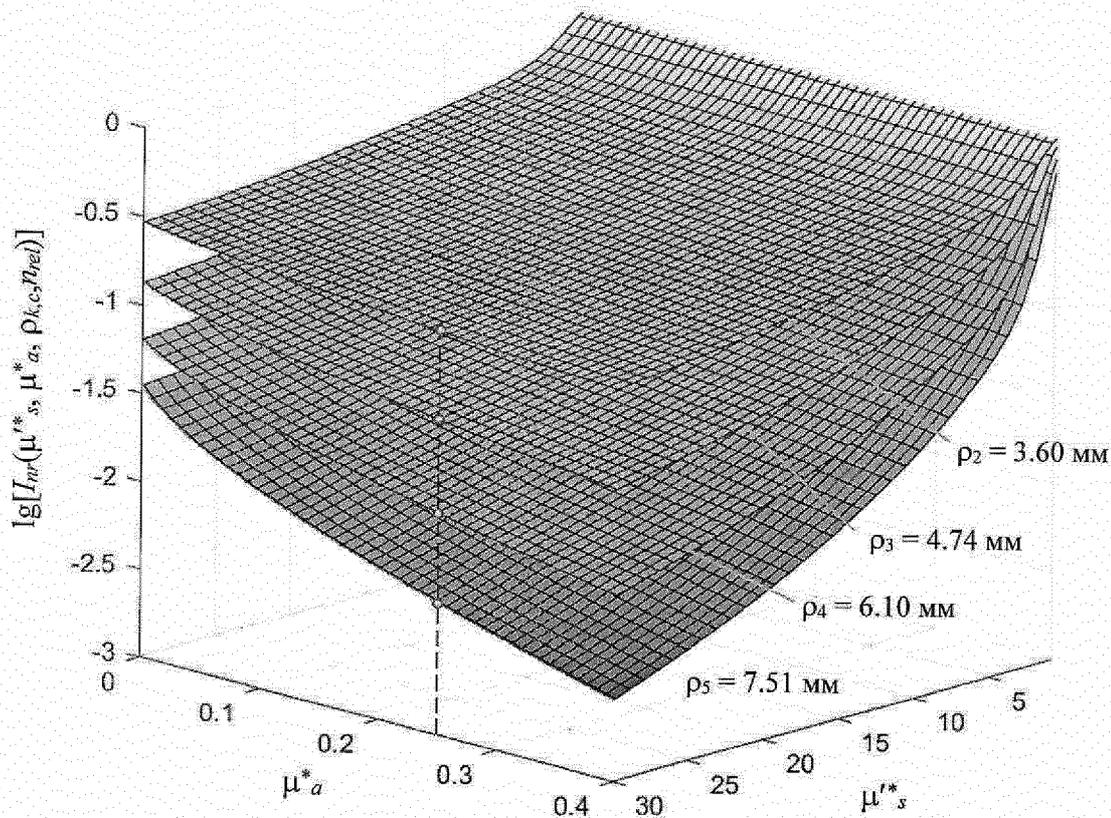
Фиг. 1

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния  
и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и  
устройство для его осуществления

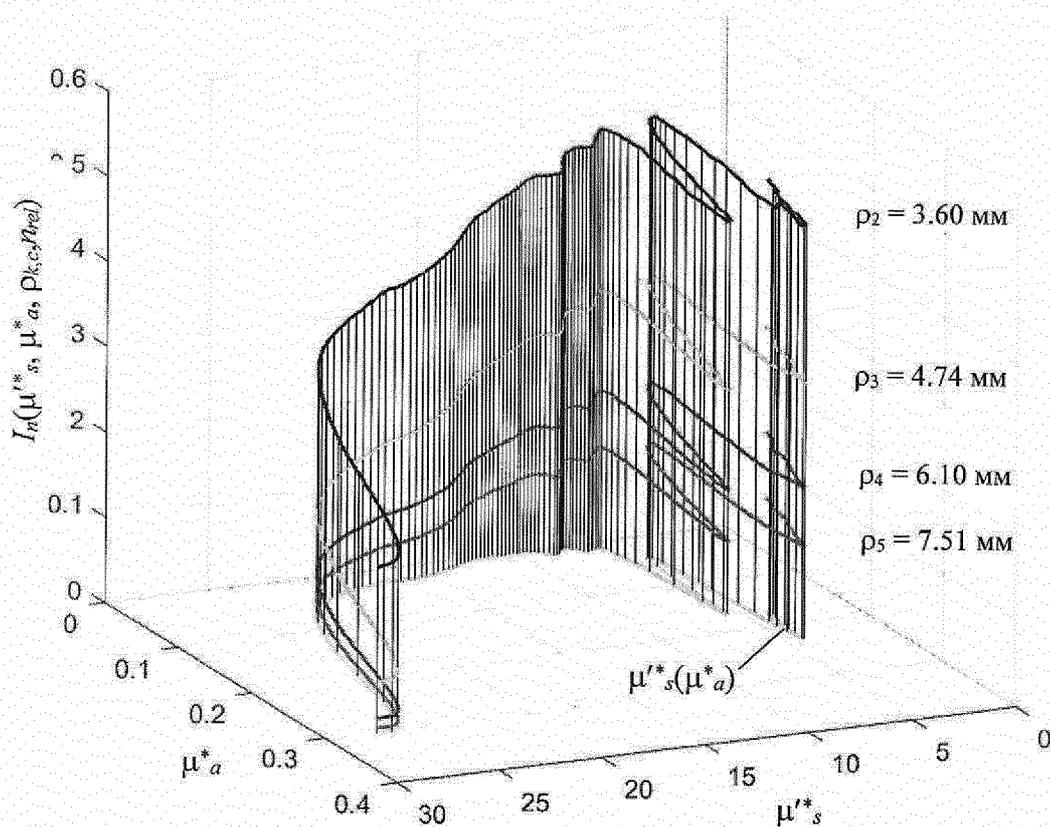


Фиг. 2

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления

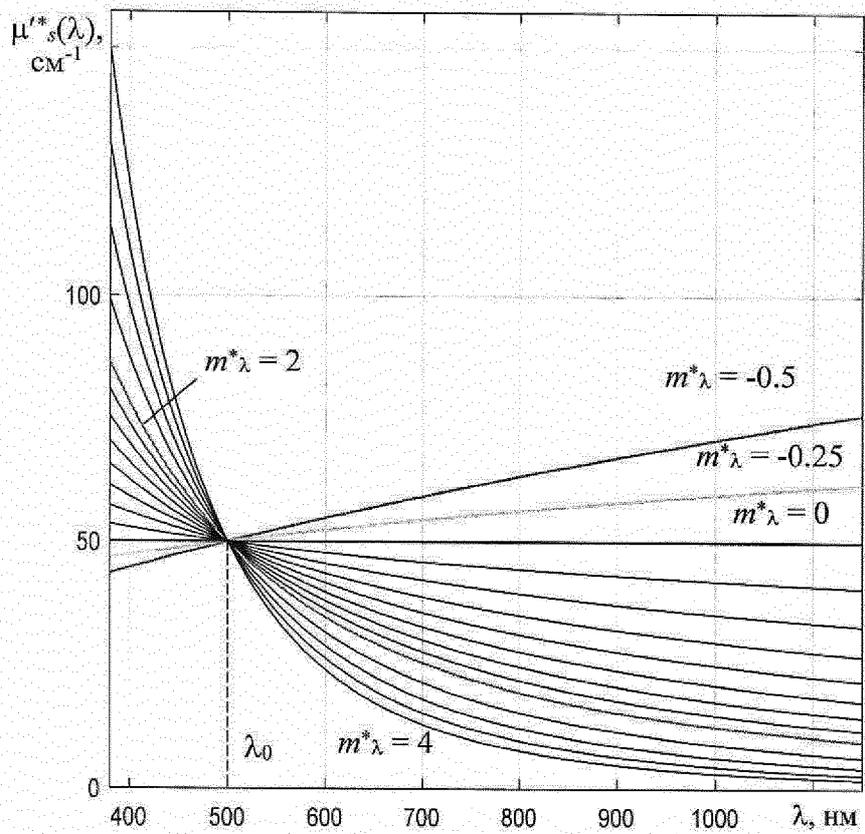


Фиг. 3

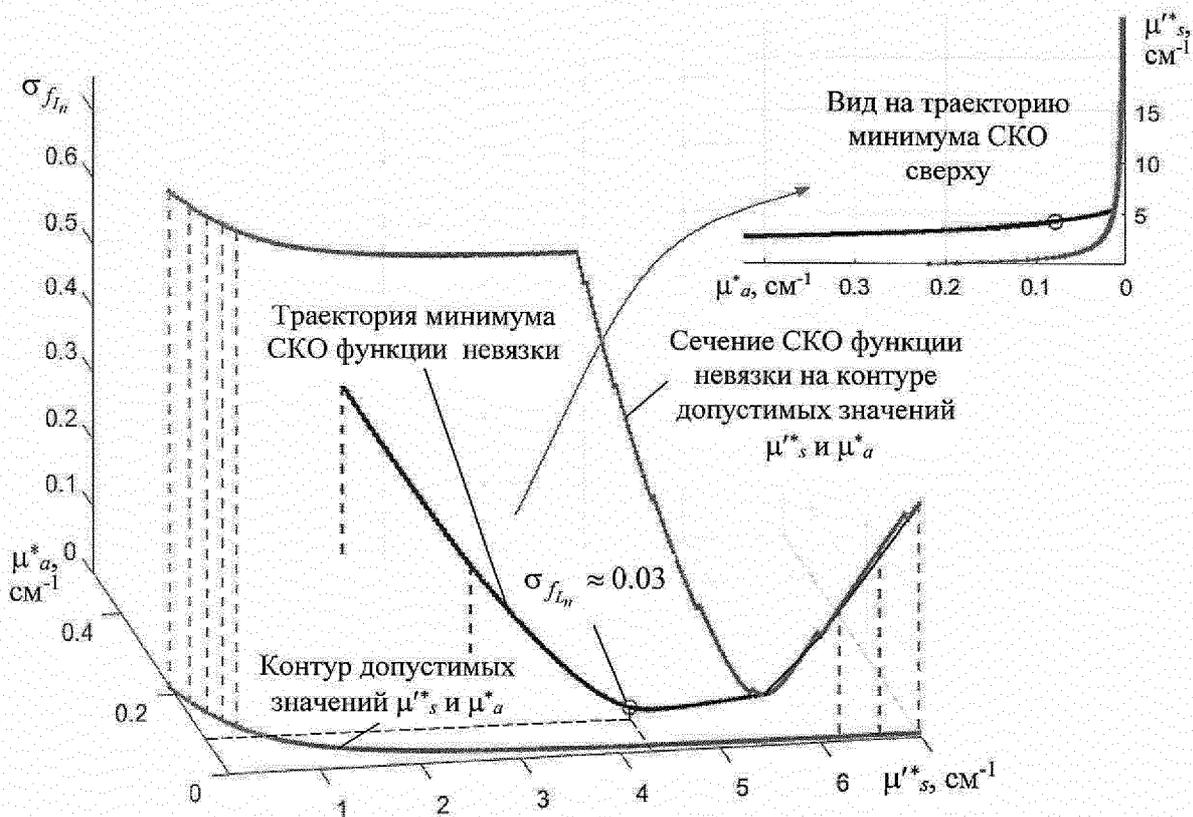


Фиг. 4

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления

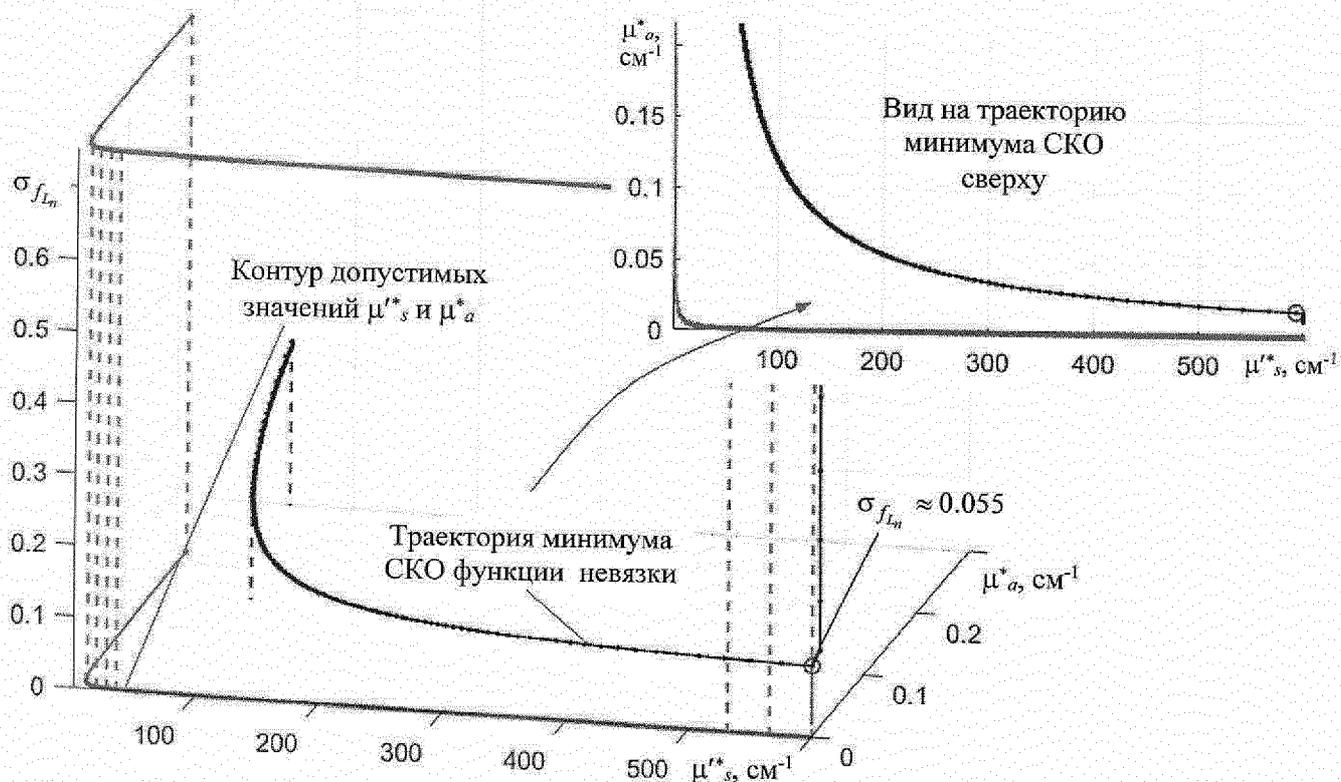


Фиг. 5

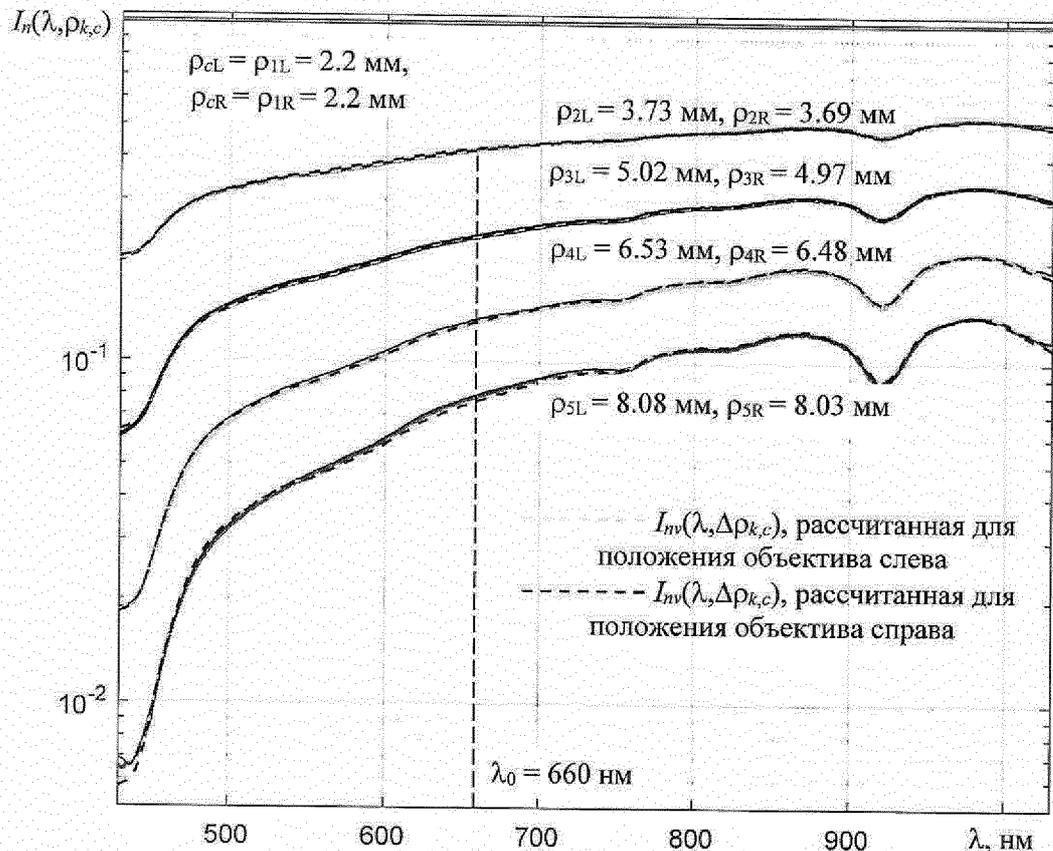


Фиг. 6

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления

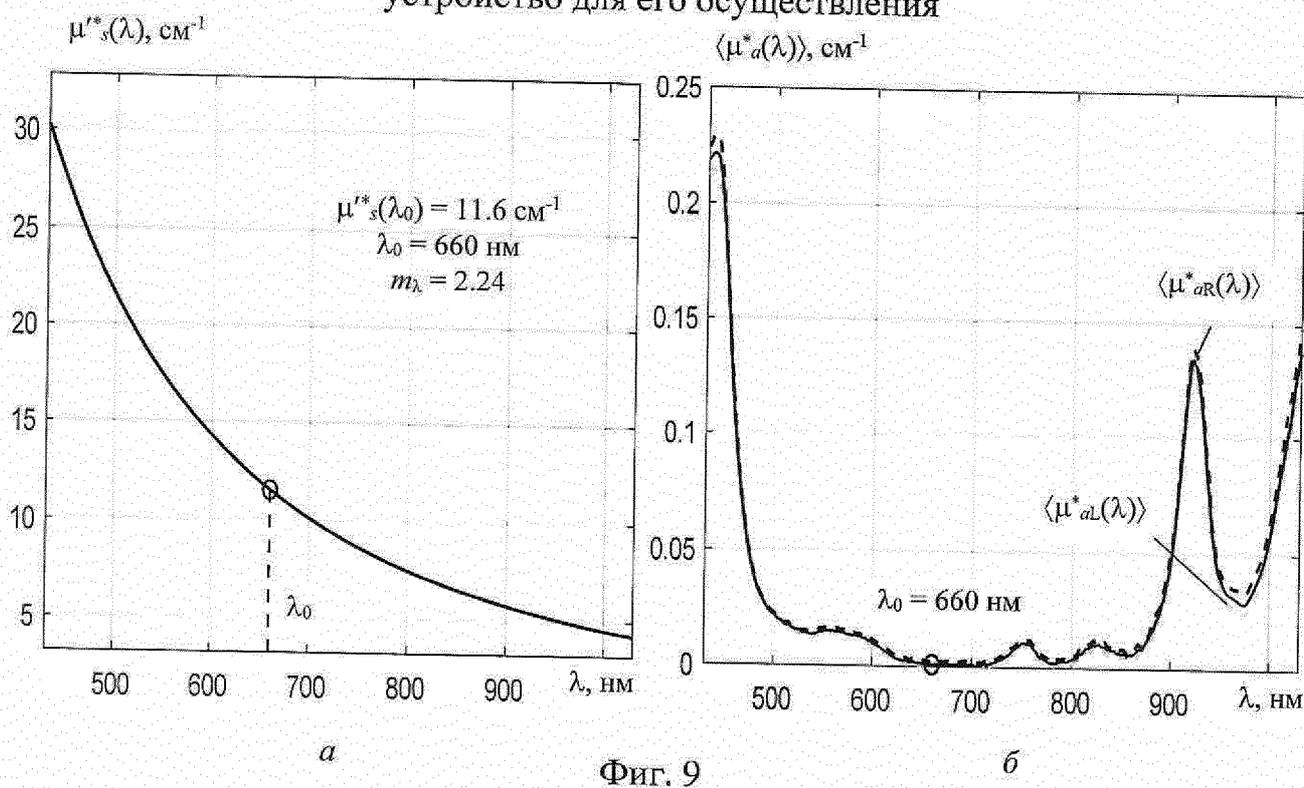


Фиг. 7

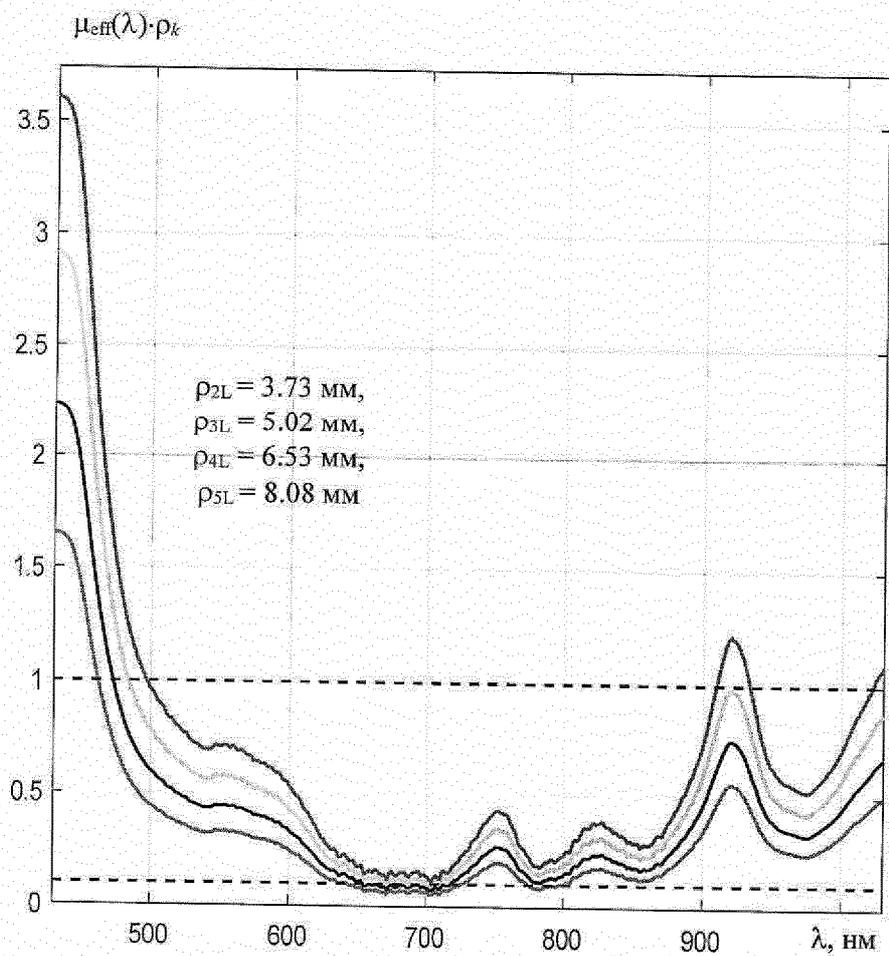


Фиг. 8

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления

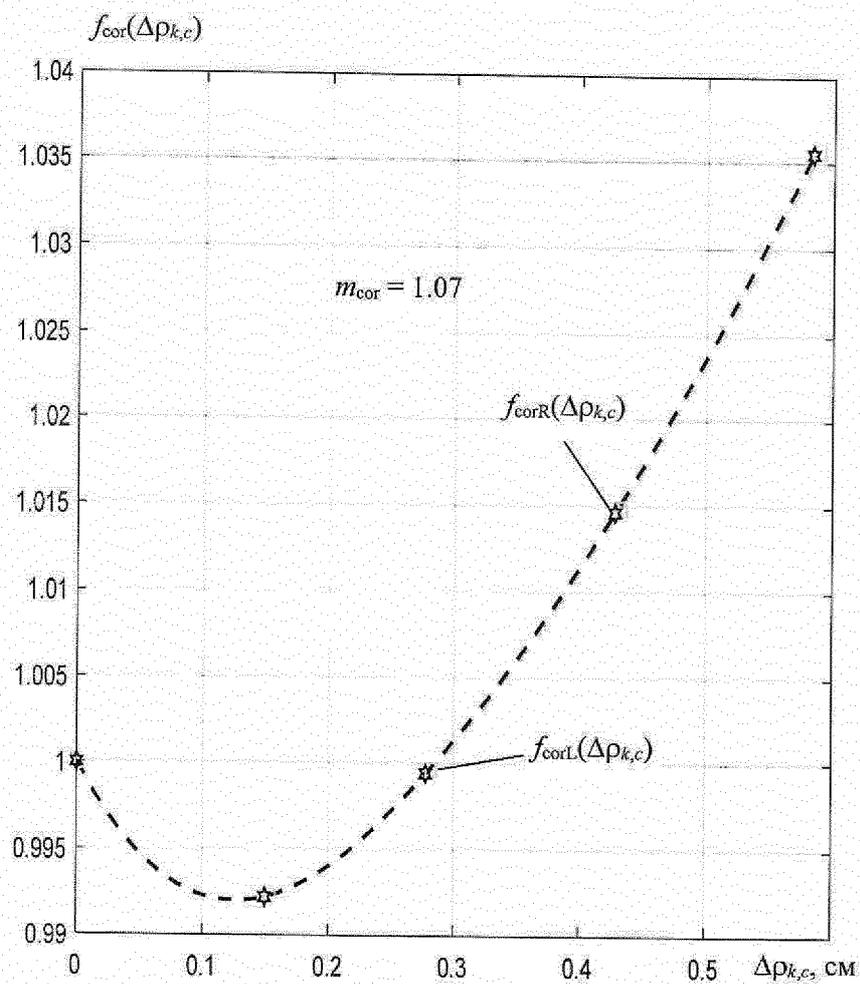


Фиг. 9



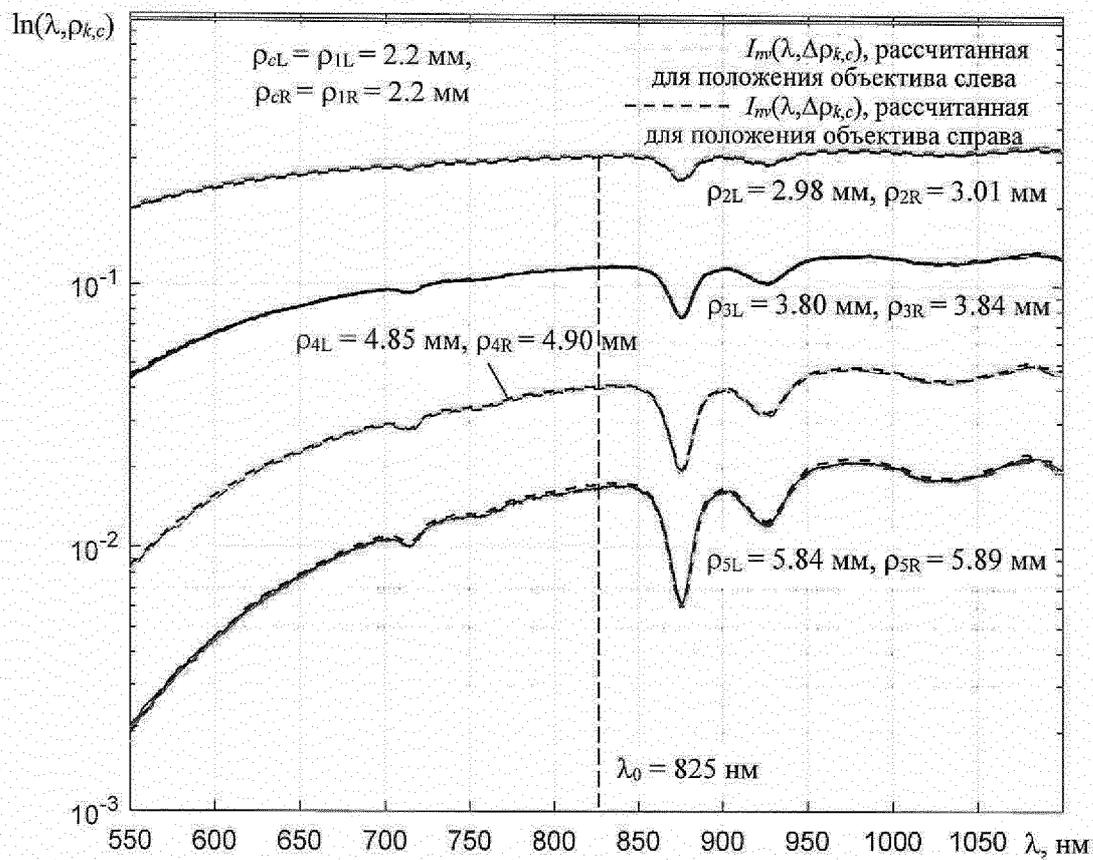
Фиг. 10

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния  
и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и  
устройство для его осуществления



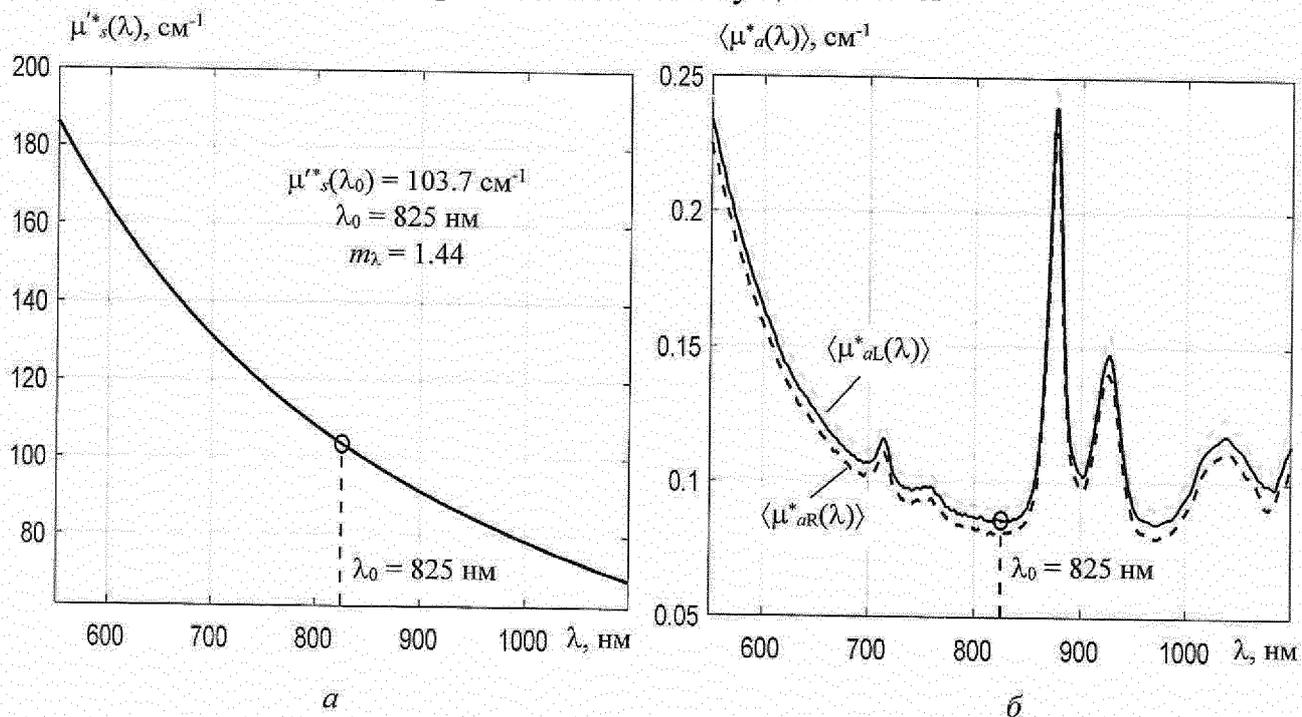
Фиг. 11

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления

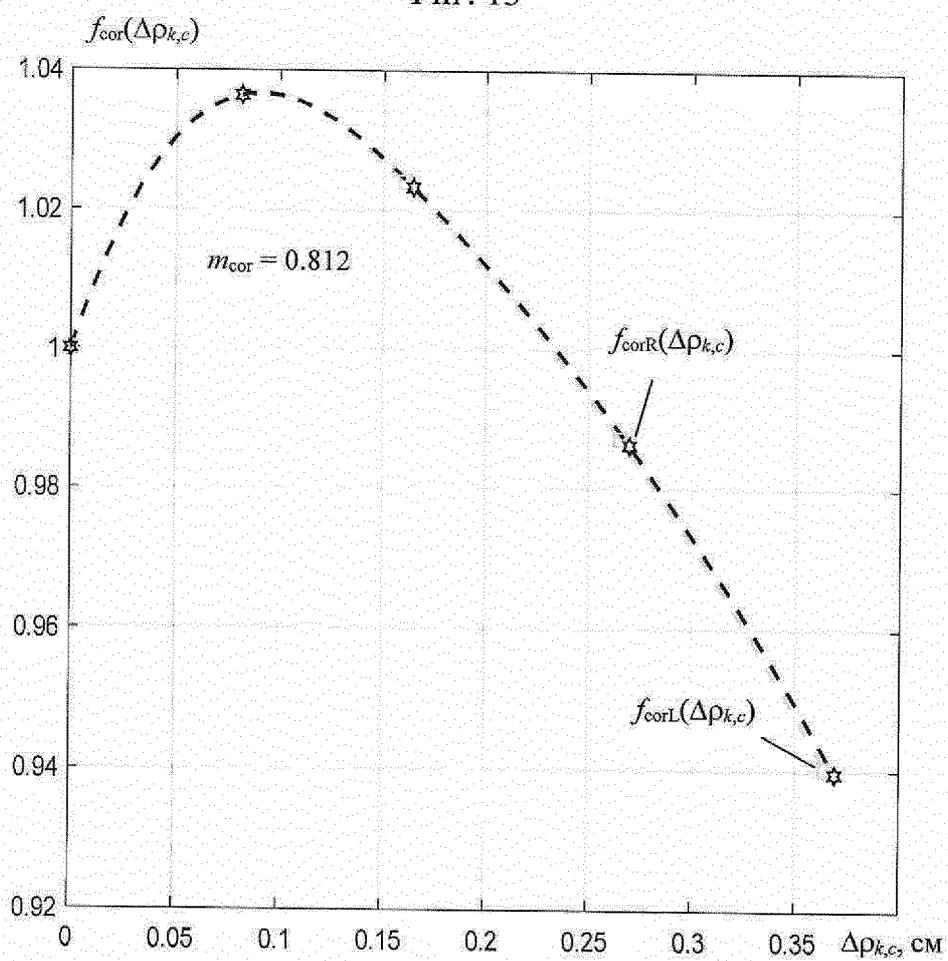


Фиг. 12

Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния  
и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и  
устройство для его осуществления



Фиг. 13



Фиг. 14

**ОТЧЕТ О ПАТЕНТНОМ ПОИСКЕ**

(статья 15(3) ЕАПК и правило 42 Патентной инструкции к ЕАПК)

Номер евразийской заявки:

**202292115****А. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕДМЕТА ИЗОБРЕТЕНИЯ:**  
**G01N 21/41 (2006.01)**

Согласно Международной патентной классификации (МПК)

**Б. ОБЛАСТЬ ПОИСКА:**Просмотренная документация (система классификации и индексы МПК)  
G01J 3/18, 3/20, G01N 21/00, 21/01, 21/25, 21/41, 21/47Электронная база данных, использовавшаяся при поиске (название базы и, если, возможно, используемые поисковые термины)  
ЕАПАТИС, Espacenet, Google Patents**В. ДОКУМЕНТЫ, СЧИТАЮЩИЕСЯ РЕЛЕВАНТНЫМИ**

Категория*	Ссылки на документы с указанием, где это возможно, релевантных частей	Относится к пункту №
A, D	DOORNBOS R. et al. The determination of <i>in vivo</i> human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy, Phys. Med. Biol., 1999, vol. 44, № 4, pp. 967-981	1-2
A	NASUTION A. Simple and novel extraction scheme for broadband tissue optical-parameters from diffuse measurements using single pair of source-detector probe В: «2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012)», 12-14 June 2012, Kuala Lumpur: IEEE, 2012.09.20, pp. 68-73	1-2
A, T	ЛЫСЕНКО С.А. и др. Сравнительный анализ методов спектроскопии диффузного отражения биоткани В: «XIII международная научно-техническая конференция «МЕДЭЛЕКТРОНИКА-2022» СРЕДСТВА МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И НОВЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», 8-9 декабря 2022, Минск: БГУИР, 2022, с. 29-32	1-2
A, T	FIRAGO V.A. et al. Diffuse Reflectance Spectrophotometers Based on C12880MA and C11708MA Mini-Spectrometers Hamamatsu, Devices and Methods of Measurements, 2022, vol. 13, № 2, pp. 93-104	1-2
A	US 10172523 B2 (OMNI MEDSCI INC) 2019-01-08, весь документ	1-2
A	BELAY G. Y. et al. Miniaturized broadband spectrometer based on a three-segment diffraction grating for spectral tissue sensing, Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134, 106157.	1-2

 последующие документы указаны в продолжении

\* Особые категории ссылочных документов:

«А» - документ, определяющий общий уровень техники

«D» - документ, приведенный в евразийской заявке

«E» - более ранний документ, но опубликованный на дату подачи евразийской заявки или после нее

«O» - документ, относящийся к устному раскрытию, экспонированию и т.д.

"P" - документ, опубликованный до даты подачи евразийской заявки, но после даты испрашиваемого приоритета"

«Т» - более поздний документ, опубликованный после даты приоритета и приведенный для понимания изобретения

«X» - документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска, порочащий новизну или изобретательский уровень, взятый в отдельности

«Y» - документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска, порочащий изобретательский уровень в сочетании с другими документами той же категории

«&amp;» - документ, являющийся патентом-аналогом

«L» - документ, приведенный в других целях

Дата проведения патентного поиска: **13/01/2023**

Уполномоченное лицо:

Начальник отдела механики,  
физики и электротехники

 Д.Ф. Крылов