

Ф И З И К А

УДК 538.958

DOI: 10.31429/vestnik-18-3-56-64

АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ

Мамелина А. С., Мамелин Ю. В., Копытов Г. Ф., Бузько В. Ю.

В статье рассматривается проблема работы машинного зрения, способного с достаточной точностью ориентироваться в условиях улицы с большим количеством биообъектов. Для решения этой проблемы в весенне-летние периоды 2018–2020 гг. было произведено накопление массива данных спектров диффузного отражения света от зеленых листьев лиственных деревьев, на основании которого по критерию согласия Пирсона (χ^2) в вероятностном интервале от 5 до 95 % была рассчитана область значений коэффициентов диффузного отражения света, характерная для зелёных, вечно зеленых и естественно стареющих желтых листьев деревьев. Также были найдены коэффициенты корреляции Пирсона и коэффициенты k и b линейной функции. Данные коэффициенты являются эталонными значениями, но не достаточными для точного определения роботом себя в пространстве, поэтому впервые была предложена эмпирическая модель, описывающая всю совокупность оптических характеристик диффузного отражения света от листьев.

Ключевые слова: спектроскопия, диффузное отражения света, листья, критерий согласия Пирсона, вероятностный интервал, коэффициенты линейной функции.

ANALYSIS OF THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF PLANT LEAVES

A. S. Mamelina, Yu. V. Mamelin, G. F. Kopytov, V. Yu. Buzko

Kuban State University, Krasnodar, Russia
e-mail: nastuka@list.ru

Abstract. The article deals with the problem of machine vision, capable of navigating with sufficient accuracy in a street area with a high number of biological objects. To solve this problem in the spring-summer periods of 2018–2020, an array of data on the spectra of diffuse reflection of light from green leaves of deciduous trees was accumulated, on the basis of which the range of values diffuse light reflectance characteristic of green, evergreen and naturally aging yellow leaves of trees. The Pearson correlation coefficients and the k and b coefficients of the linear function were also calculated. These coefficients are reference values, but not sufficient for the robot to accurately determine itself in space, therefore, for the first time, an empirical model was proposed that describes the entire set of optical characteristics of diffuse reflection of light from leaves.

Keywords: spectroscopy, diffuse reflection, leaves, Pearson's chi-squared test, probability interval, coefficients of a linear function.

Введение

Технологии машинного зрения на сегодняшний день способны анализировать достаточно большое количество данных, могут работать в широких оптических диапазонах длин волн от 300 до 2500 nm [1], однако работа в таком диапазоне и одновременная обработка различных параметров изображения требует больших вычислительных ресурсов [2], что существенно снижает скорость обработки информации. Наибольшее количество информации приходится обрабатывать робототех-

ническим средствам, работающим на открытом пространстве в городской или сельской местности [3]. Им необходимо в условиях различной освещенности правильно выполнять свою задачу, а значит, их техническое зрение должно обрабатывать весьма большое количество информации. В большинстве случаев зрение таких роботов работает в видимом оптическом и в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне длин волн [4], что говорит о необходимости выявления закономерностей отражательной способности окружающих биообъектов. Данная проблема является актуальной

Мамелина Анастасия Сергеевна, ассистент кафедры теоретической физики и компьютерных технологий Кубанского государственного университета; e-mail: nastuka@list.ru.

Мамелин Юрий Валерьевич, аспирант кафедры теоретической физики и компьютерных технологий Кубанского государственного университета; e-mail: ymamelin@bk.ru.

Копытов Геннадий Филиппович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и нанотехнологий Кубанского государственного университета; e-mail: 137@mail.ru.

Бузько Владимир Юрьевич, канд. хим. наук, доцент кафедры радиофизики и нанотехнологий Кубанского государственного университета; e-mail: buzkonmr@mail.ru.

на сегодняшний день ведь точность определения объектов с помощью машинного зрения должна быть достаточно высока для быстрого и правильного выполнения поставленных задач [5]. Наиболее распространенными биообъектами на улице являются деревья и кустарники [6], поэтому в первую очередь необходимо определить оптические характеристики листьев биообъектов растительного происхождения. Опираясь на знание того, что листья биообъектов растительного происхождения являются органом, обеспечивающим функционирование фотосинтеза посредством преобразования электромагнитной энергии УФ, оптического и БИК-диапазона длин волн [7], а также того, что основным компонентом в тканях листьев для реализации фотосинтеза служат органические пигменты хлорофиллы *a* и *b* и каротиноиды в составе пластид [8], которые в свою очередь являются природными органическими полупроводниками [9]. Листья биообъектов растительного происхождения можно рассматривать как функциональные композитные материалы, оптические свойства в УФ и видимом диапазоне длин волн в основном определяются содержанием в них органических пигментов [10], а в БИК-диапазоне длин волн — определяются его влажностью, толщиной и структурой [11]. Данные закономерности могут и должны быть описаны с помощью эмпирической модели. Таким образом, целью данной статьи является получение эмпирической модели оптических характеристик диффузного отражения света.

Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие задачи:

1) Произвести качественный анализ спектров диффузного отражения света от зеленых листьев деревьев в спектральном диапазоне длин волн от 300 до 900 *nm*.

2) Определить разброс значений истинной дисперсии, распределенный по критерию согласия (χ^2) в вероятностном интервале от 5 до 95%, который бы определил область и характер изменения спектра диффузного отражения света от зеленых листьев деревьев в диапазоне длин волн от 300 до 900 *nm*.

3) Определить значения линейных коэффициентов *k* и *b* и построить таблицу распределения данных значений между пиками спектров диффузного отражения света от зеленых и естественно стареющих листьев деревьев и кустарников.

4) Построить эмпирическую модель, описывающую оптические характеристики листьев.

1. Материалы и оборудование

Для проведения исследования на территории Кубанского государственного университета были собраны и исследованы зелёные листья следующих видов деревьев: сирень (*Syringa*), абрикос (*Prunus armeniaca*), береза (*Batula*), вишня (*Cerasus*), клен (*Acer*), дуб (*Quercus*), акация (*Acacia*), роза (*Rosa*), гибискус (*Hibiscus*), облепиха (*Hippophaë*), орешник (*Corylus*), голубая ель (*Picea pungens*), ель (*Picea abies*), туя (*Thuja occidentalis*), сосна (*Pinus*), можжевельник (*Juniperus*). Эти деревья относятся к типичным видам для районов с переходным климатом от мягкого континентального к субтропическому согласно классификации Кёппена. Образцы выбранных листьев деревьев были взяты с нижних частей кроны, по шесть образцов одного вида, три из которых — с теневой части кроны, а другие три — с освещенной части кроны. Измерение спектральных характеристик от выбранных образцов зеленых листьев лиственных деревьев производилось в течении времени, не превышающего одного часа после их срезания с веток деревьев.

Измерения спектров диффузного отражения света от выбранных образцов листьев производилось в лабораторных условиях с использованием оптического спектрофотометра *Hitachi U3900* с двухканальной интегрирующей сферой в спектральном диапазоне длин волн от 350 до 950 *nm* с разрешением 1 *nm* и скоростью сканирования одного образца 300 *nm/min*. Для чистоты эксперимента было получено по три измерения спектра диффузионного отражения света от каждого исследованного образца, после чего производилось усреднение полученного массива данных в рамках одного исследованного вида растений.

2. Результаты измерений и обсуждения

Полученные массивы данных спектров диффузного отражения света (СДО) от листьев деревьев и кустарников представленных растений можно разделить на две основные группы: зеленые и естественно стареющие. К группе естественно стареющих относятся спектры диффузного отражения света от исследованных образцов лиственных листьев деревьев и кустарников, полученные в период времени года с середины августа до на-

чала ноября. Соответственно все остальные данные спектров диффузного отражения от лиственных и вечнозеленых пород деревьев и кустарников относятся к группы зеленых листьев.

Все данные СДО от зеленых листьев деревьев представлены на рис. 1а как математические ожидания $M(R)$ % коэффициентов диффузного отражения света для данных видов деревьев в отдельных точках исследованного диапазона длин волн от 300 до 900 nm . На рис. 1б представлены аналогичные данные СДО в том же диапазоне для листьев кустарников.

Данные рисунки имеют схожий характер изменения графика при изменении длины волны, имеют общие пики и участки монотонности, а значит, можно произвести общий анализ рис. 1а и 1б. Можно проследить, что в областях спектра от 300 до 490 nm и от 660 до 680 nm зелёные листья исследованных видов деревьев и кустарников имеют относительно низкую отражательную способность в пределах от 5 до 7 %. Это обусловлено тем, что в этих областях спектра содержащиеся в листьях органические полупроводниковые пигменты имеют высокую интенсивность поглощения получаемого электромагнитного излучения [12–15]. Возрастание спектра диффузного отражения света от исследованных образцов зеленых листьев в окрестностях от 490 до 550 nm обусловлено снижением эффективности поглощения электромагнитного излучения содержащимися в листьях органических полупроводниковых пигментов [10], а в окрестности 550 nm спектр достигает своего локального максимума, где значение коэффициента отражательной способности для исследованных образцов зеленых листьев деревьев и кустарников колеблется в диапазоне от 11 % до 13 % [2, 12, 14, 15]. В области длин волн от 550 до 660 nm прослеживается плавное понижение спектра диффузного отражения от исследованных образцов листьев, а слабозаметные максимумы в окрестностях 630 nm и 660 nm соответствуют пикам поглощения хлорофиллов *a* и *b*.

К группе зеленых растений также относятся вечнозеленые [14], $M(R)$ % СДО которых представлены на рис. 2.

В связи с тем, что в городской местности большая часть растительного покрова имеет смешанный тип, можно анализировать СДО от листьев лиственных и хвойных пород де-

ревьев и кустарников как от единой группы зеленых листьев.

В соответствии с данной позицией произведен расчет $M(R)$ спектра диффузного отражения света от зеленых листьев деревьев и кустарников, который характеризует группу зеленых листьев как единого целого. Также для проведения дальнейшего анализа характеристик зеленых листьев растений рассчитана вероятностная область значений коэффициентов диффузного отражения, характерная для зеленых листьев. Данная область значений представлена на рис. 3 в виде распределения истинной дисперсии среднего арифметического в доверительном интервале вероятности от 5 до 95 % в соответствии с распределением χ^2 относительно $M(R)$ спектра диффузного отражения света от зеленых листьев.

На рис. 3 приведен график распределения истинной дисперсии, рассчитанный в соответствии с критерием согласия Пирсона (χ^2) в вероятностном интервале значений от 5 до 95 %, относительно математического ожидания $M(R_{avg})$, полученного усреднением математических ожиданий коэффициентов диффузного отражения света от исследованных образцов листьев деревьев (представленных на рис. 1а и 1б). Данный график определяет вероятностный разброс значений коэффициентов диффузного отражения света, характерный для зеленых листьев лиственных деревьев. Также по рис. 1б видно, что разброс значений коэффициентов диффузного отражения в видимом диапазоне длин волн относительно математического ожидания незначительный и в среднем составляет 0,8–1 %. В ближнем ИК диапазоне спектра данный разброс значительно выше и в среднем составляет 6–8 %. Такое поведение спектра в диапазоне длин волн от 680 до 900 nm объясняется различной толщиной исследованных образцов листьев лиственных деревьев и кустарников.

Помимо рассмотренных СДО света от естественно стареющих листьев деревьев и кустарников зеленого цвета, были рассмотрены СДО света желтых и желто-зеленых листьев. $M(R)$ СДО света таких листьев представлены на рис. 4. На графиках явно прослеживается, что в зависимости от уровня деградации хлорофиллов в структуре естественно стареющих листьев происходит снижение поглощающей способности в диапазоне длин волн от 500 до 680 nm , следовательно, и происхо-

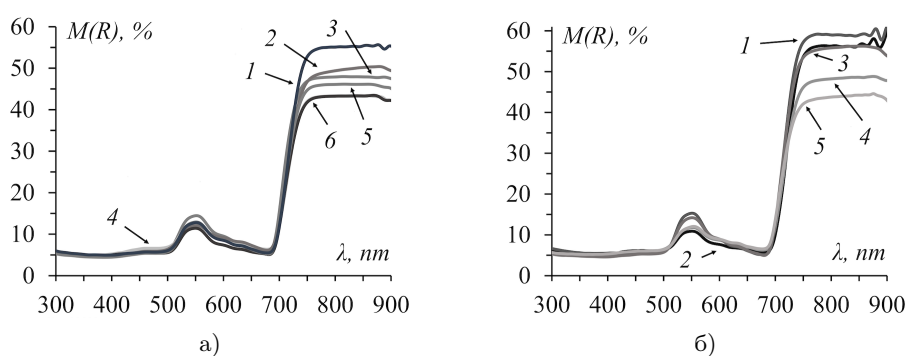


Рис. 1. Спектры диффузионного отражения света:
 а) лиственных деревьев: 1) акация, 2) вишня, 3) береза, 4) абрикос, 5) дуб, 6) клен;
 б) лиственных кустарников: 1) гибискус, 2) орешник, 3) облепиха, 4) сирень, 5) роза

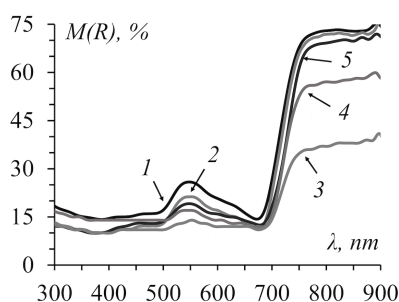


Рис. 2. Математические ожидания спектров диффузного отражения света от различных пород вечнозеленых листьев деревьев и кустарников:
 1) голубая ель, 2) ель, 3) туя, 4) сосна, 5) можжевельник

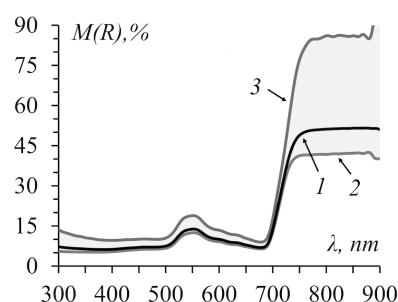


Рис. 3. Распределение истинной дисперсии среднего арифметического относительно математического ожидания в вероятностном интервале 90 %, где: 1 — $M(R_{\text{ест.-стар.}})$, 2 — верхняя граница вероятностной области распределения, 3 — нижняя граница вероятностной области распределения

дит изменение визуальной окраски листьев, что согласуется с работами [12–15]. Несмотря на значительный разброс значений отражательной способности естественно стареющих листьев деревьев и кустарников относительно зеленых в диапазоне длин волн от 500 до 680 nm , положение минимумов отражения в данном интервале спектра сопоставимы, что подтверждается результатами работ [12–15].

Рис. 4б показывает рассчитанную область значений коэффициентов диффузного отражения (КДО), характерную для естественно стареющих листьев деревьев и кустарников. Такая область значений в соответствие с распределением χ^2 определяется в виде распределения истинной дисперсии среднего арифметического в доверительном интервале вероятности от 5 до 95 %. Производя численный анализ полученной области значений КДО характерных для естественно стареющих листьев, необходимо сказать, что наибольший

разброс значений наблюдается в области спектра от 500 до 680 nm , который происходит из-за деградации хлорофиллов [13, 15]. Но, если сравнить области распределения значений КДО света в ближнем ИК-диапазоне длин волн, то явно видно, что область значений, описывающая свежие зеленые листья, в несколько раз превышает область, описывающую естественно стареющие листья. Данный факт можно объяснить несколькими причинами, во-первых в тканях естественно стареющих листьев снижается уровень содержания воды и, соответственно, уменьшается толщина листовая пластины, что приводит к снижению отражательной способности в ближнем ИК-диапазоне длин волн, а во-вторых весьма многократный разброс значений обусловлен влиянием спектральных характеристик хвойных пород деревьев и кустарников..

Численная мера взаимосвязи между изменениями СДО света от зеленых и естественно

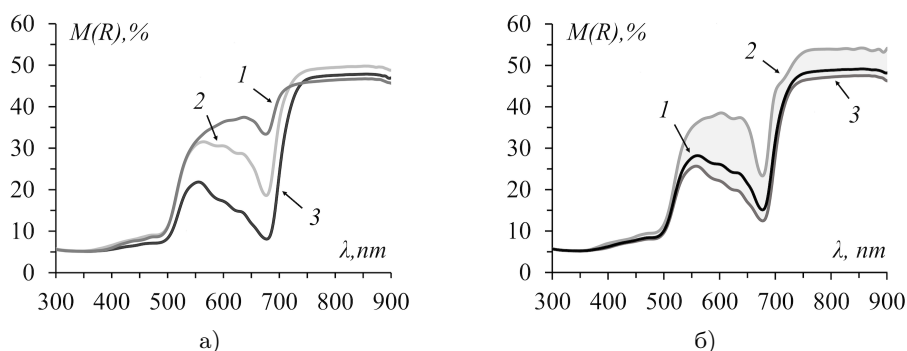


Рис. 4. Спектральные характеристики естественно стареющих листьев лиственных деревьев и кустарников: а) математическое ожидание спектров диффузного отражения от естественно стареющих листьев деревьев и кустарников: 1) желтой окраски, 2) желто-зелёной окраски, 3) зелёной окраски; б) область распределения истинной дисперсии относительно математического ожидания, характеризующего естественно стареющие листья: 1) математическое ожидание, 2) нижняя граница вероятностного интервала, 3) верхняя граница вероятностного интервала

Таблица 1. Численное распределение коэффициентов k и b линейной функции, между пиками СДО света

Положение пика, nm	465		553		650		680		750	
	от	до	от	до	от	до	от	до	от	до
Коэффициент Пирсона-г естественно стареющих листьев / зелёных листьев										
465			0,689	0,860	0,958	0,979	0,958	0,982	0,400	0,701
553	0,990	0,995			0,589	0,859	0,689	0,808	0,579	0,803
650	0,976	0,89	0,989	0,995			0,978	0,990	0,339	0,664
680	0,976	0,989	0,984	0,993	0,998	0,999			0,275	0,622
750	0,997	0,998	0,990	0,995	0,973	0,987	0,971	0,986		

стареющих листьев деревьев и кустарников между основными максимумами и минимумами отражательной способности листьев, выраженная в виде коэффициента корреляции Пирсона-г представлена в табл. 1.

Произведённый качественный анализ данных, представленных в табл. 1 на основании шкалы Чеддока, показал, что полученные численные значения коэффициентов корреляции Пирсона-г, в основных пиках СДО света от зеленых листьев, имеют различную силу связи. Очевидно, что высокая сила связи находится между минимумами отражательной способности в области 680 nm , 650 nm и 465 nm , что в соответствии с работами [2, 12] говорит о высокой поглощающей способности хлорофиллов. Также, тесная взаимосвязь прослеживается между коэффициентами в окрестностях длин волн 553 nm и 465 nm , 680 nm и 553 nm , что в соответствии с данными работ [2, 12] объясняется несколькими факторами: во-первых, эта взаимосвязь может быть обусловлена изменением концентрацией хлорофиллов в тканях лиственных

и хвойных листьев деревьев и кустарников, во-вторых, она может быть обусловлена физиологическими характеристиками листьев (толщиной, плотностью и др.)

Между максимумами и минимумами СДО света, образующихся у данных образцов листьев в рамках представленных на рис. 3 и 4б вероятностных областей распределения КДО света от зеленых и естественно стареющих листьев, можно построить линейные зависимости, где коэффициенты k и b линейной функции будут определять характер изменения СДО. Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Однако невозможно накопить абсолютное значение коэффициентов и параметров, позволяющих правильно определять объект, поэтому нам необходима некоторая математическая модель, которая будет определять необходимый и достаточный набор параметров для точного и правильного определения биообъекта.

Корреляционный анализ силы линейной взаимосвязи пар КДО света от зеленых и

Таблица 2. Численное распределение коэффициентов k и b линейной функции, между СДО света

Положение пика, nm	465		553		650		680		750	
	от	до	от	до	от	до	от	до	от	до
Коэффициент смещения линейной функции вдоль оси $M(R)$ / тангенс угла наклона касательной для пиков естественно стареющих листьев										
465			0,120	0,296	0,048	0,140	0,022	0,068	0,135	0,154
553	-85,0	-128			-0,089	-0,001	-0,101	-0,090	0,106	0,090
650	-14,5	-56,1	75,0	35,9			-0,140	-0,380	0,295	0,178
680	-2,23	-22,3	81,7	85,4	108,1	282,4			0,481	0,417
750	-54,7	-62,2	-32,9	-14,2	-174,9	-80,3	-314,8	-259,6		
Коэффициент смещения линейной функции вдоль оси $M(R)$ / тангенс угла наклона касательной для пиков зеленых листьев										
465			0,070	0,099	0,005	0,002	0,001	0,005	0,123	0,235
553	-26,3	-36,2			-0,054	-0,088	-0,048	-0,078	0,146	0,296
650	3,96	9,40	42,3	67,3			-0,028	-0,046	0,339	0,668
680	6,07	12,5	38,9	61,8	25,2	40,1			0,497	0,974
750	-50,6	-99,3	-68,2	-144,7	-213,7	-423,7	-331,9	-653,0		

естественно стареющих листьев биообъектов растительного происхождения в окрестности 465 nm , 553 nm , 650 nm , 680 nm и 750 nm длин волн выявил, что в большинстве случаев наблюдается высокая и весьма высокая сила взаимосвязи. На основании чего следует, что для точечного математического описания оптических характеристик биообъектов растительного происхождения возможно ввести коэффициенты линейной функции, определяемые в общем виде из системы уравнений

$$\begin{cases} k_{(\lambda_a;\lambda_c)} = \frac{M(R(\lambda_a)) - M(R(\lambda_c))}{\lambda_a - \lambda_c}, \\ b_{(\lambda_a;\lambda_c)} = M(R(\lambda_c)) - k_{(\lambda_a;\lambda_c)}\lambda_c, \end{cases} \quad (2.1)$$

где индексы a и c при λ указывают на длины волн, в которых идентифицируются независимые точки спектра λ_a и λ_c , необходимые для нахождения коэффициентов k и b , $M(R(\lambda_a))$ и $M(R(\lambda_c))$ — коэффициенты диффузного отражения света, выраженные в %, на выбранных длинах волн, $k_{(\lambda_a;\lambda_c)}$ — угловой коэффициент линейной функции, $b_{(\lambda_a;\lambda_c)}$ — коэффициент линейного смещения линейной функции.

Исходя из системы уравнений (2.1) и того, что листья биообъектов растительного происхождения определяются областью распределения истинной дисперсии относительно математических ожиданий спектров диффузного отражения света от зеленых и естественно стареющих листьев в соответствии с критерием Пирсона χ^2 в вероятностном интервале значений от 5 % до 95 %, следует, что для точечного математического описания

коэффициенты линейной функции k и b определяются областью значений, выраженной системой неравенств

$$\begin{cases} \frac{\psi^-}{\lambda_a - \lambda_c} \leq k_{(\lambda_a;\lambda_c)} \leq \frac{\psi^+}{\lambda_a - \lambda_c}, \\ \xi^- \leq b_{(\lambda_a;\lambda_c)} \leq \xi^+, \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\psi^\pm = (M(R(\lambda_a)) \mp (\sigma_{от}^2(\lambda_a)) - (M(R(\lambda_c)) \mp (\sigma_{от}^2(\lambda_c))),$$

$$\xi^\pm = (M(R(\lambda_c)) \mp (\sigma_{от}^2(\lambda_c)) - k_{от/до}^{\lambda_a;\lambda_c} \lambda_c.$$

Здесь $\sigma_{от}^2(\lambda_a)$ и $\sigma_{от}^2(\lambda_c)$ — соответственно определяются нижней и верхней границами изменения истинной дисперсии с вероятностью 90 %, а $k_{от}^{\lambda_a;\lambda_c}$ и $k_{до}^{\lambda_a;\lambda_c}$ — соответственно, определяются нижней и верхней границами изменения углового коэффициента линейной функции.

С другой стороны, рассчитанные и показанные на рис. 3 и 4б математические ожидания и области распределения значений коэффициентов диффузного отражения характерных для естественно стареющих и зеленых листьев деревьев и кустарников являются необходимыми критерием/условием для выдвижения и гипотез о равенстве дисперсий и математических ожиданий. Откуда также следует, что необходимым условием для описания обобщенной модели математического ожидания спектров диффузного отражения

света от листьев биообъектов растительно-го происхождения как функциональных композитных материалов является нахождение коэффициента S , определяемого интегрированием функции коэффициента отражения относительно длины волны

$$S = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} M(R(\lambda))d\lambda, \quad (2.3)$$

где λ_{\min} и λ_{\max} — интегрируемый диапазон длин волн, $M(R(\lambda))d\lambda$ — математическое ожидание функции диффузного отражения света

А вероятностная область распределения значений коэффициентов диффузного отражения света, характерная как для зелёных, так и для естественно стареющих листьев биообъектов растительного происхождения и точка, лежащая в этом вероятностном интервале значений определяющиеся параметром $S_{\text{точ}}$ из неравенства

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (M(R(\lambda)) - \sigma_{\min}^2(\lambda)) d\lambda \leq S_{\text{точ}} \leq \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (M(R(\lambda)) + \sigma_{\max}^2(\lambda)) d\lambda. \quad (2.4)$$

Параметр $S_{\text{точ}}$ описывает всю совокупность оптических характеристик диффузного отражения света от листьев биообъектов растительного происхождения как от функциональных композитных материалов, откуда следует, что данный параметр может быть использован для дальнейшего сравнительного анализа оптических характеристик синтетических материалов, тканей или пигментов. Данный параметр с аналитической точки зрения может быть использован на всем исследованном диапазоне длин волн, однако с точки зрения практического использования этого параметра целесообразным будет его применение для сравнительного анализа на отдельно взятых участках спектра (от 350 до 410 nm , от 540 до 570 nm , от 650 до 680 nm и от 750 до 780 nm), которые описывают спектральные особенности диффузного отражения света от листьев биообъектов растительного происхождения. Такие участки спектра определяются в окрестностях локальных точек минимумов и максимумов спектров

диффузного отражения света от биообъектов рассматриваемых типов.

Выводы

В данной работе произведено исследование оптических характеристик диффузного отражения света от зеленых, вечнозеленых и естественно стареющих желтых листьев деревьев в спектральном диапазоне длин волн от 300 до 900 nm . Рассчитан вероятностный интервал значений коэффициентов диффузного отражения света по критерию согласия Пирсона (χ^2) в диапазоне истинного распределения от 5 до 95 %, который описывает область и возможный характер изменения спектра диффузного отражения света от данных образцов. В ходе анализа полученных графиков были выявлены характерные пики минимумов и максимумов спектров диффузного отражения света. Были рассчитаны и занесены в таблицы значения распределения коэффициентов корреляции Пирсона-г и коэффициентов k и b линейной функции между основными пиками отражательной способности листьев. Численные значения коэффициентов необходимы машинному зрению как некоторые эталонные измерения, относительно которых робот сможет анализировать предметы вокруг него, однако среда может меняться, в местности могут преобладать различные биообъекты и, поэтому необходимо дать устройству дополнительный функционал, который поможет ему не сбиться с выбранного курса. Для выполнения этой задачи впервые была построена эмпирическая модель, описанная интегральным параметром $S_{\text{точ}}$, который отражает всю совокупность оптических характеристик диффузного отражения света от листьев биообъектов растительного происхождения как от функциональных композитных материалов, а также линейными коэффициентами k и b , которые определяют характер изменения спектральных характеристик.

Литература

1. Костылев Д.А. Машинное зрение в робототехнических системах // Наука, техника и образование. 2016. № 7. С. 55–58.
2. Denning, R.J. Camouflage fabrics. In Menghe Miao, John H. Xin (eds.) The Textile Institute Book Series, Engineering of High-Performance Textiles. Woodhead Publishing, 2018. P. 349–375. DOI: 10.1016/b978-0-08-101273-4.00016-0
3. Kasteck, M. Multispectral and hyperspectral measurements of soldier's camouflage equipment

- // Active and Passive Signatures III. 2012. DOI: 10.1117/12.918393
4. Shengyong Chen. Active vision in robotic systems: A survey of recent developments // *The International Journal of Robotics Research* 2011. Vol. 30(11) 1343–1377 DOI: 10.1177/0278364911410755
 5. Горитов А.Н. Предварительная обработка изображений в системах технического зрения // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21, № 4. С. 70–82.
 6. Bar-On Y.M. The biomass distribution on Earth. In *Proc. of the National Academy of Sciences*, 2018. DOI: 10.1073/pnas.1711842115
 7. Ипатов В.С. Фитоценология. СПб.: И-76 Изд-во С.-Петербурга. ун-та, 1997. 316 с.
 8. Ben Yang. Bioinspired multifunctional organic transistors based on natural chlorophyll/organic semiconductors // *Advanced materials*. 2020. DOI: 10.1002/adma.202001227
 9. Erhard E. Optical properties of plant surfaces // *Biology of the Plant Cuticle* 2006. DOI 10.1002/9781119312994.apr0234
 10. Лозовицкий Д.А. Изучение липофильных веществ травы *Taraxacum officinale wigg* // Научный результат. Медицина и фармация. 2017. Т. 3, № 1. С. 56–62. DOI: 10.18413/2313-8955-2017-3-1-56-62
 11. Баландайкин М. Вариация пигментного комплекса пластид *Betula L.* в зависимости от факторов среды // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. Т. 10, № 2. С. 10–20.
 12. Stéphane J. Leaf optical properties // Cambridge University Press, 2019. DOI: 10.1017/9781108686457
 13. Мерзляк М.Н. Пигменты, оптика листа // Соросовский образовательный журнал. 1998. Т. 4. С. 19–24.
 14. Mamelin Y.V., Kopytov G.F., Buzko V.Y. Discrimination of coniferous and deciduous leaves of trees and shrubs from decorative and artificial materials by optical diffuse reflectance spectroscopy // *Optics and spectroscopy*. 2020. Vol. 128. No. 2. P. 280–284.
 15. Mamelin Y.V., Kopytov G.F., Buzko V.Y. Studying optical characteristics of diffused light reflecting from naturally senescing leaves of deciduous trees // *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series natural sciences*. 2020. Vol. 92. No. 5. P. 72–82.
 - Miao, John H. Xin (eds.) *The Textile Institute Book Series, Engineering of High-Performance Textiles*. Woodhead Publishing, 2018. P. 349–375. DOI: 10.1016/b978-0-08-101273-4.00016-0
 3. Kastek, M., Multispectral and hyperspectral measurements of soldier’s camouflage equipment. *Active and Passive Signatures III*, 2012. DOI: 10.1117/12.918393
 4. Shengyong, C. Active vision in robotic systems: A survey of recent developments. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, vol. 30(11), pp. 1343–1377. DOI: 10.1177/0278364911410755
 5. Goritov, A.N. Predvaritel’naya obrabotka izobrazheniy v sistemakh tekhnicheskogo zreniya [Pre-processing of images in technical vision systems]. *Doklady TUSUR* [Reports of TUSUR], 2018, vol. 21, no. 4, pp. 70–82. (In Russian)
 6. Bar-On, Y.M. The biomass distribution on Earth. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 2018. DOI: 10.1073/pnas.1711842115
 7. Ipatov, V.S. *Fitotsenologiya* [Phytocenology]. I-76 Izd-vo S.-Peterburg. un-ta, St.-Petersburg, 1997. (In Russian)
 8. Yang, Ben. Bioinspired Multifunctional Organic Transistors Based on Natural Chlorophyll/Organic Semiconductors. *Advanced materials*, 2020. DOI: 10.1002/adma.202001227
 9. Erhard, E. Optical properties of plant surfaces. *Biology of the Plant Cuticle*, 2006. DOI: 10.1002/9781119312994.apr0234
 10. Balandaykin, M., Variatsiya pigmentnogo kompleksa plastid *Betula L.* v zavisimosti ot faktorov sredy [Variation of the pigment complex of *Betula L.* plastids depending on environmental factors]. *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2013, no. 2, pp. 10–20. (In Russian)
 11. Lozovitskiy, D.A. Izucheniye lipofil’nykh veshchestv travy *Taraxacum officinale wig* [Study of lipophilic substances in the herb *Taraxacum officinale wigg*]. *Nauchnyy rezul’tat. Meditsina i farmatsiya* [Scientific result. Medicine and Pharmacy], 2017, vol. 3, no. 1, pp. 56–62. DOI: 10.18413/2313-8955-2017-3-1-56-62 (In Russian)
 12. Stéphane, J. Leaf optical properties. *Cambridge University Press*, 2019. DOI: 10.1017/9781108686457
 13. Merzlyak, M.N., Pigmenty, optika lista [Pigments, sheet optics]. *Sorosovskiy obrazovatel’nyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1998, vol. 4, pp. 19–24. (In Russian)
 14. Mamelin, Y.V., Kopytov, G.F., Buzko, V.Y. Discrimination of coniferous and deciduous leaves of trees and shrubs from decorative and artificial materials by optical diffuse reflectance spectroscopy. *Optics and spectroscopy*, 2020, vol. 128, no. 2, pp. 280–284.
 15. Mamelin, Y.V., Kopytov, G.F., Buzko, V.Y.

References

Studying optical characteristics of diffused light reflecting from naturally senescing leaves of deciduous trees. *Herald of the Bauman Moscow*

State Technical University. Series natural sciences, 2020, vol. 92, no. 5, pp. 72–82.

© Мамелина А. С., Мамелин Ю. В., Копытов Г. Ф., Бузько В. Ю., 2021

Статья открытого доступа, распространяется по лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Статья поступила 29 мая 2021 г.

Цитирование: Мамелина А. С., Мамелин Ю. В., Копытов Г. Ф., Бузько В. Ю. Анализ оптических характеристик листьев растений // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2021. Т. 18. № 3. С. 56–64. DOI 10.31429/vestnik-18-3-56-64

Citation: Mamelina, A.S., Mamelin, Yu.V., Kopytov, G.F., Buzko, V.Yu. Analysis of the optical characteristics of plant leaves. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 56–64. (In Russian) DOI 10.31429/vestnik-18-3-56-64