

УДК 62:535.8:634

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО
СОСТАВА ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО
ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ ПО КРИТЕРИЯМ УДЕЛЬНОЙ
ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
И ОТНОСИТЕЛЬНОМУ СОДЕРЖАНИЮ ХЛОРОФИЛЛА**

Ольга Николаевна Будаговская

доктор технических наук

budagovsky@mail.ru

Федеральный Научный Центр имени И.В.Мичурина
Мичуринский государственный аграрный университет
г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Приведены результаты экспериментальной оптимизации основных элементов (излучателей и светофильтра) оптико-электронной схемы комбинированного прибора предназначенного для комплексной диагностики функционального состояния растений, объединяющей оценку фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла за один измерительный цикл.

Ключевые слова: комбинированный прибор, спектр излучателей, спектр пропускания светофильтра, фотосинтетическая активность, содержание хлорофилла, листья растений.

В работе [1] было проведено обоснование конструктивного решения комбинированной оптико-электронной аппаратуры для диагностики функционального состояния растений, объединяющей оценку фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла за один измерительный цикл. Для его реализации необходимо провести теоретическую и экспериментальную оптимизацию основных элементов оптико-электронной схемы прибора, что является целью данной работы.

В первую очередь необходимо решить вопрос оптимизации спектрального состава источника излучения, предназначенного для оценки относительного содержания хлорофилла. Для этого была осуществлена серия экспериментов по измерению коэффициентов пропускания, цвета и спектров отражения трех групп листьев лимона с различным содержанием хлорофилла, визуально классифицируемые как «Желтые», «Светло-зеленые» и «Темно-зеленые» (рис.1).



Рисунок 1 – Типичный цвет листа из групп А) темно-зеленых, Б) светло-зеленых и В) желтых листьев лимона.

Критерием отбора является максимальные различия оптических параметров между заданными группами. Коэффициенты пропускания листьев оценивали на запатентованном авторском фотометре [2] на 4 длинах волн: 625 ± 10 нм, 525 ± 11 нм, 460 ± 15 нм и 940 ± 13 нм. Цвет и спектры отражения листьев измеряли с помощью портативного спектроколориметра CM-700d/600d

(Konica Minolta, Япония). Результаты статистической обработки полученных данных представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Статистический анализ данных измерений коэффициентов пропускания листьев на 4 длинах волн

Вариант	Статистические данные	Спектральный коэффициент пропускания листа, %			
		625±10 нм	525±11 нм	460±15 нм	940±13 нм
<i>Желтые листья</i>	Среднее	33,04167	23,2	8,116667	50,9583
	Стандартная ошибка	2,959767	0,900168	0,605634	0,41949
	Стандартное отклонение	10,25293	3,118275	2,097979	1,45318
	Дисперсия выборки	105,1227	9,723636	4,401515	2,11174
	Коэффициент вариации	0,310303	0,134408	0,258478	0,02851
<i>Светло-зеленые листья</i>	Среднее	8,875	13,14167	4,858333	55,1666
	Стандартная ошибка	0,485568	0,640603	0,217234	0,53418
	Стандартное отклонение	1,682058	2,219115	0,752521	1,85047
	Дисперсия выборки	2,829318	4,92447	0,566288	3,42424
	Коэффициент вариации	0,189528	0,168861	0,154893	0,03354
<i>Темно-зеленые листья</i>	Среднее	1,525	4,425	2,066667	46,75
	Стандартная ошибка	0,075	0,214661	0,074196	0,30463
	Стандартное отклонение	0,259808	0,743609	0,257023	1,05529
	Дисперсия выборки	0,0675	0,552955	0,066061	1,11363
	Коэффициент вариации	0,170366	0,168047	0,124366	0,02257

Была также рассчитана достоверность различий по критерию Стьюдента с использованием функции «ТТЕСТ» программы Excel. Для всех представленных вариантов она превосходила значения 0,999, что не позволило данный параметр использовать в качестве критерия оптимизации.

Анализ полученных данных показывает, что использование красного источника (625 нм) в режиме пропускания дает наибольший динамический диапазон различий между вариантами, но и наибольшую вариабельность показаний (табл.1). Зеленый источник (525 нм) также перспективен в силу небольшой вариабельности коэффициента пропускания и достаточности динамического диапазона. Остальные типы излучателей (460 нм и 940 нм)

неэффективны для поставленной цели диагностики относительного содержания хлорофилла.

Таблица 2

Статистический анализ данных измерений цвета листьев в системе цветовых координат *Lab*

Вариант	Статистические данные	Цветовые характеристики		
		<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
<i>Желтые листья</i>	Среднее	71,85667	7,191667	39,02667
	Стандартная ошибка	0,304649	0,052244	3,945062
	Стандартное отклонение	0,746235	0,127971	9,663388
	Дисперсия выборки	0,556867	0,016377	93,38107
	Коэффициент вариации	0,010385	0,017794	0,24761
<i>Светло-зеленые листья</i>	Среднее	47,74833	- 11,2117	41,915
	Стандартная ошибка	1,037122	0,22129	5,278278
	Стандартное отклонение	2,540421	0,542049	12,92909
	Дисперсия выборки	6,453737	0,293817	167,1613
	Коэффициент вариации	0,053204	- 0,04835	0,30846
<i>Темно-зеленые листья</i>	Среднее	32,655	- 9,15333	20,41833
	Стандартная ошибка	0,254804	0,087927	5,717626
	Стандартное отклонение	0,624139	0,215376	14,00527
	Дисперсия выборки	0,38955	0,046387	196,1475
	Коэффициент вариации	0,019113	- 0,02353	0,685916

L - яркость от 0 до 100, *a* – спектр от зеленого (-128) через серый к красному (127), *b* – спектр от синего (-128) через серый к желтому [3,4].

Количественная оценка цвета верхней стороны листа также вполне корректно отражает относительное содержание хлорофилла. Расчет цветового различия между вариантами опыта, проведенный по классической формуле:

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

дает следующие показатели:

$$\Delta E (\text{желтые} - \text{светло-зеленые}) = 26,42$$

$$\Delta E (\text{светло-зеленые} - \text{темно-зеленые}) = 36,94$$

$$\Delta E (\text{желтые} - \text{темно-зеленые}) = 46,38.$$

Таким образом, колориметрический метод и портативный спектроколориметр CM-700d/600d могут служить прототипом при испытании прибора.

Для определения оптимальных длин волн при реализации оптической схемы оценки относительного содержания хлорофилла в режиме отражения, используем графики зависимостей коэффициента отражения от длины волны, для трех вариантов опыта, представленные на рисунке 2.

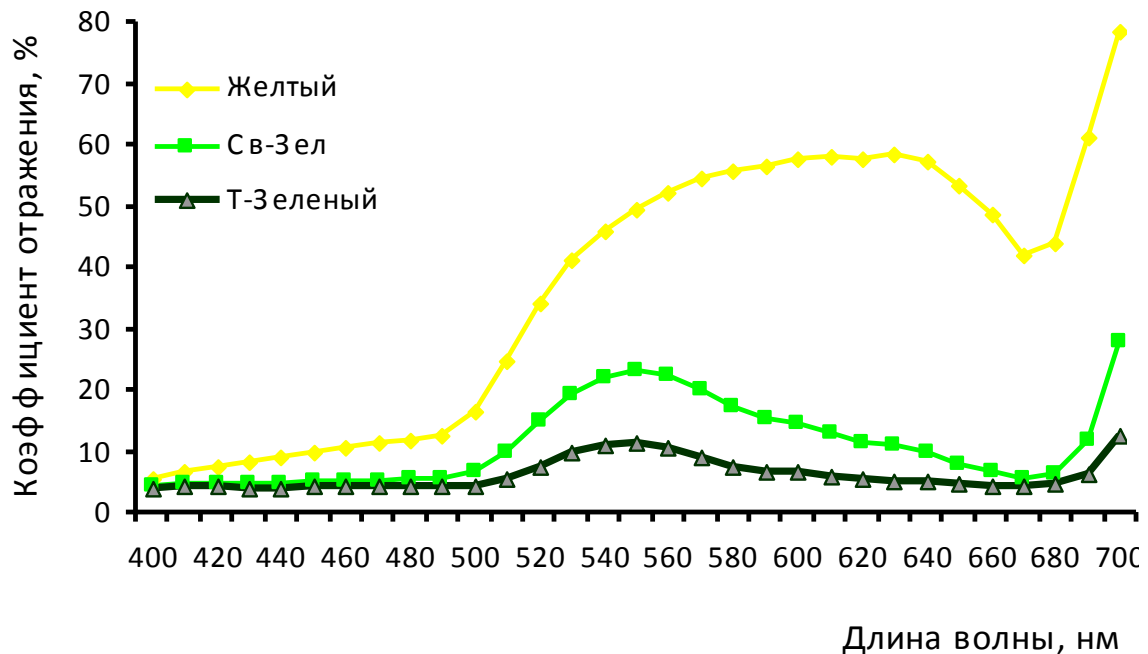


Рисунок 2 – Типичные спектральные кривые отражения темно-зеленых, светло-зеленых и желтых листьев лимона

Использование любой длины волны возможно в довольно широком диапазоне – от 520 до 620 нм, поскольку на этом спектральном участке отмечается наибольшая разница показаний. Уход за границы диапазона как в большую, так и в меньшую сторону неблагоприятно сказывается в возможности дифференциации групп «светло-зеленых» и «темно-зеленых» листьев между собой.

Таким образом, и в режиме пропускания и в режиме отражения оптимальный спектральный состав источника излучения, используемого для определения относительного содержания хлорофилла, включает и зеленый и красный длины волн. Но более точный выбор спектра излучения этого излучателя будет в определенной степени зависеть и от спектральных

характеристик светофильтров, используемых для фильтрации информационного сигнала.

Для этого следует использовать данные ГОСТ 9411-91 по спектральным коэффициентам пропускания цветных светофильтров [6]. Если исходить из требования максимального коэффициента поглощения в синей области спектра излучателя, предназначенного для возбуждения флуоресценции (450-470 нм) и минимального – в диапазоне длин волн флуоресценции хлорофилла (680-750 нм) и в спектральной области измерения относительного содержания хлорофилла, то подходят светофильтры типа ОС и КС (рис.3).

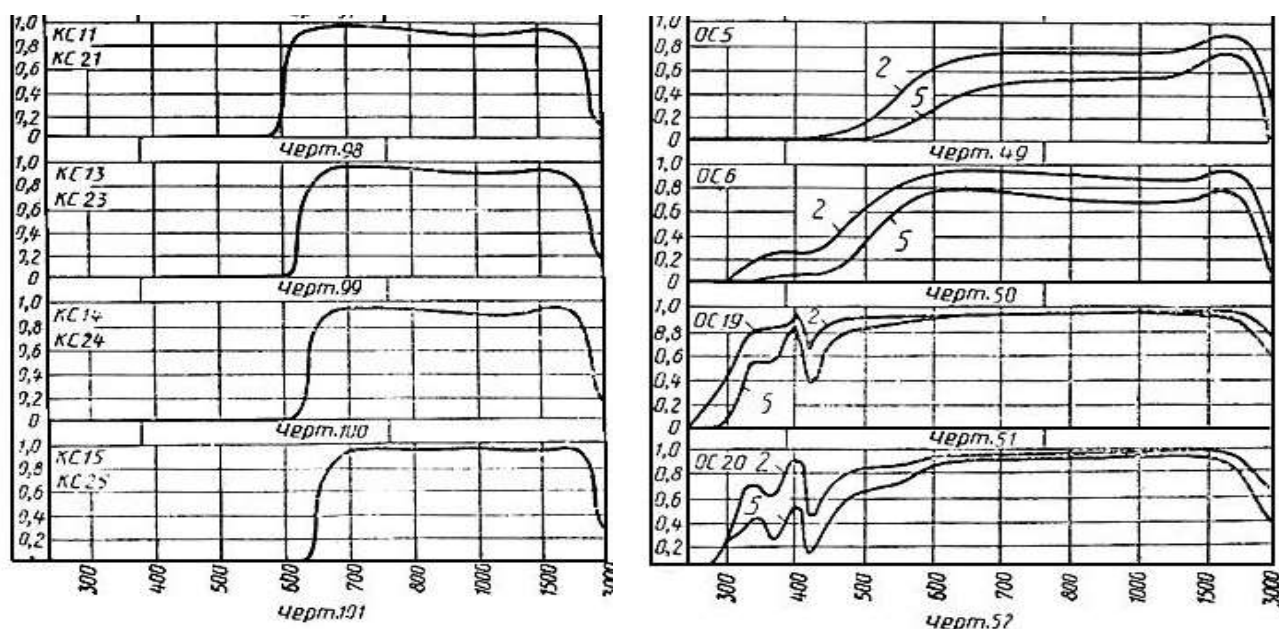


Рисунок 3 – Спектры пропускания светофильтров серии Кс (слева) и серии ОС (справа). По данным ГОСТ 9411-91 [6].

При этом светофильтры серии ОС позволят использовать и зеленые и красные излучатели, а типа КС – только красные и только определенных длин волн в зависимости от типа светофильтра. Следует отметить, что испытания различных вариантов типов излучателей и светофильтров показал (данные не представлены), что использование светофильтров типа ОС, имеющих широкую полосу пропускания в области 500... 1200 нм, приводит к высокому уровню фона, существенно превышающему информационный сигнал, даже если работать в условиях небольшой освещенности. В связи с вышеизложенным, в конструкции прибора в качестве светофильтра для селективной спектральной

фильтрации информационных потоков наиболее целесообразно использование светофильтров типа КС 11, имеющих коэффициент пропускания не ниже 60 % в диапазоне длин волн 600-1500 нм и полностью поглощающих излучение в спектральном диапазоне от 400 до 580 нм. Это, в свою очередь, обуславливает применение красных излучателей (620-660 нм) в качестве источника зондирующего потока для оценки относительного содержания хлорофилла.

Список литературы:

1. Будаговская О.Н. Обоснование конструктивного решения оптического прибора для оценки функционального состояния листьев растений по критериям фотосинтетической активности и относительному содержанию хлорофилла // Наука и Образование. 2022. Т. 5. № 1.

2. Патент РФ №156626 на полезную модель «Простое устройство для экспресс-оценки светопропускной способности укрывных материалов в области фотосинтетически активной радиации» /Авторы: Будаговская О.Н., Козлова И.И., Гончаров С.А. - Зарегистрирован в госреестре полезных моделей РФ 16.10.2015. - Заявка № 201511759/28 от 31 марта 2015 г. – Опубликовано 10.11.2015, Бюлл. №31. – 5 с.

3. Hunt R.W.G. Measuring Color. 2nd Edition. - Ellis Horwood Limited, Chichester, 1991- 313 p.

4. Домасев М. В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. - СПб.: Питер, 2009. – 224 с.

5. Джадд, Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. – М.: Мир, 1978. – 592 с.

6. ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное. Технические условия. - М.: Издательство стандартов, 1992. – 48 с.

UDC 62:535.8:634

**EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF THE SPECTRAL
COMPOSITION OF COMBINED EMITTERS OPTICAL DEVICE FOR
ASSESSING THE FUNCTIONAL STATE OF PLANT LEAVES
ACCORDING TO THE CRITERIA OF SPECIFIC PHOTOSYNTHETIC
ACTIVITY AND THE RELATIVE CONTENT OF CHLOROPHYLL**

Olga N. Budagovskaya

doctor of technical Sciences

budagovsky@mail.ru

Federal research Center named after I. V. Michurin

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Annotation. The results of experimental optimization of the main elements (emitters and light filter) of the optoelectronic circuit of a combined device designed for complex diagnostics of the functional state of plants, combining the assessment of photosynthetic activity and the relative content of chlorophyll in one measuring cycle are presented.

Key words: combined device, emitter spectrum, filter transmission spectrum, photosynthetic activity, chlorophyll content, plant leaves

Статья поступила в редакцию 07.05.2022; одобрена после рецензирования 09.06.2022; принята к публикации 30.06.2022.

The article was submitted 07.05.2022; approved after reviewing 09.06.2022; accepted for publication 30.06.2022.