

УДК 62:535.8:634

**КОНСТРУКЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ
ПО КРИТЕРИЯМ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
И ОТНОСИТЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА**

Ольга Николаевна Будаговская

доктор технических наук, в.н.с.

Федеральный Научный Центр имени И.В.Мичурина

Мичуринский государственный аграрный университет

budagovsky@mail.ru

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Приведено описание конструкции макетного образца оптического прибора для комплексной оценки функционального состояния растений по критериям фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла за один измерительный цикл.

Ключевые слова: фотосинтетическая активность, относительное содержание хлорофилла, листья, комбинированный прибор, макетный образец.

В работах [1-4] было проведено теоретическое и экспериментальное обоснование основных параметров рабочих органов опико-электронного оборудования для комплексной диагностики функционального состояния растений, объединяющей оценку фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла за один измерительный цикл. На базе полученных данных был сконструирован и изготовлен макетный образец комбинированного прибора для измерения относительного содержания хлорофилла и фотосинтетической активности (рис.1). В приборе использованы два светодиодных излучателя: синей области спектра (465 ± 12 нм) - для возбуждения флуоресценции и оранжево-красной (620 ± 15 нм) - для оценки светопропускания.



А) Вид сверху. Справа – прижим для листьев; сверху – переключатель П1 зондирующих потоков (красный – синий); снизу - переключатель П2, задающий режим активации излучателей «ручной - автоматический»



Б) Вид сзади. Переключатель П3, задающий мощность излучения; разъем для подключения внешней кнопки управления



В) Вид сверху – активирован режим измерения относительного содержания хлорофилла



Г). Вид спереди – входная диафрагма и синий излучатель



Д) Вид спереди - активирован режим измерения ФСА

Рисунок 1 - Внешний вид макетного образца прибора комплексной диагностики функционального состояния растений.

Излучатели расположены напротив друг друга с небольшим смещением 3-4 мм по вертикали таким образом, чтобы оптическая ось входной диафрагмы регистратора была посередине между центрами излучателей и таким образом обеспечить фиксацию обоих информационных сигналов регистратором (рис.1 В, Г, Д). Интенсивность излучателей изменяется с помощью регулировки тока питания, которая имеет три дискретных уровня, выставляемых с помощью переключателя, смонтированных на задней панели прибора (рис.1Б). Диаметр входной диафрагмы прибора составил 5 мм; в качестве регистратора использовали цифровую видеокамеру А4Tech PK836F с удаленным объективом, вместо которого установлен светофильтр КС11. Переключение с режима измерения флуоресценции на режим светопропускания происходит вручную, с помощью переключателей, установленных на боковых стенках прибора (рис.1А). По результатам оптимизации длительности и последовательности циклов в дальнейшем планируется использовать программу управления излучателями или специальную электронную схему.

Оценку спектральных характеристик излучателей (максимальная длина волны λ_{\max} и полуширина спектральной линии $\Delta\lambda$) проводили с помощью спектрометра S100 (Solar, Белоруссия), оценку тока накачки I_n – с помощью мультиметра, оценку мощности оптического излучения P - с помощью измерителя мощности оптического излучения ОНІR (Израиль).

Таблица 1

Уровни излучения светодиодов, используемых в приборе

Режим (положение переключателя ПЗ)	красный излучатель		синий излучатель	
	$\lambda_{\max} \pm \Delta\lambda$	$I_n (P)$	$\lambda_{\max} \pm \Delta\lambda$	$I_n (P)$
«0»	614,5±18,3 нм	4,7 мА (2,42 мВт)	448,8±30,0 нм	5,3 мА (0,26 мВт)
«I»	613,8±20,0 нм	12,6 мА (4,77 мВт)	444,8±29,9 нм	12,3 мА (0,74 мВт)
«II»	616,6±21,4 нм	20,1 мА (7,33 мВт)	446,1±33,4 нм	21,4 мА (1,19 мВт)

Сигнал передается с цифровой камеры в компьютер для записи в виде таблицы и графика (рис.2). Последующая обработка данных осуществляется в программе Excel.

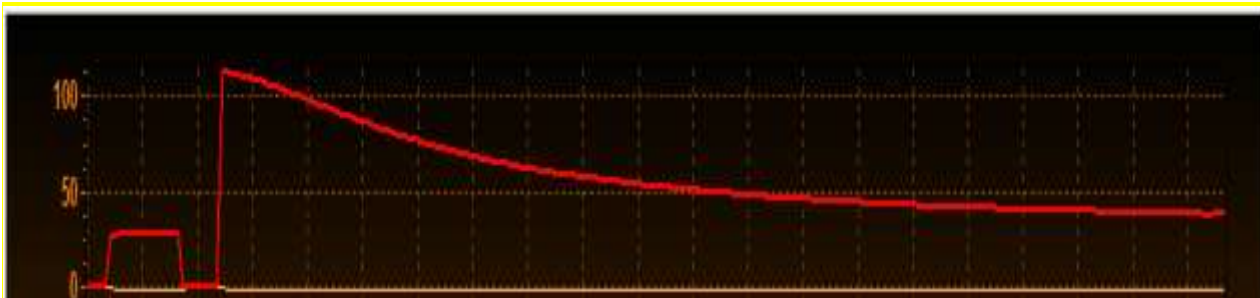


Рисунок 2 – Графическая запись данных на примере измерений светопропускания и флуоресценции темно-зеленого листа лимона.

Основным рабочим органом компьютеризированных приборов является компьютерная программа сбора и обработки данных. Спецификой оптических приборов является обязательное введение в программу обработки данных калибровочных таблиц, графиков или уравнений, с помощью которых идет корректировка данных с учетом передаточных характеристик используемых фотоприемников и определяются абсолютные значения интенсивностей измеряемых световых потоков.

Любой фотоприемник имеет ограниченную область линейного преобразования, динамический диапазон которой зависит от материала фоточувствительного слоя, типа АЦП, встроенных алгоритмов предварительной обработки данных. В работе [5] фотометрическая калибровка и определение линейных участков передаточных характеристик была осуществлена в отношении цифровой видеокамеры A4Tech, которая используется в приборе.

В нашем случае, для оценки относительного содержания хлорофилла по коэффициенту пропускания листьев в красной области спектра и фотосинтетической активности по флуоресценции, возбуждаемой в синей области спектра, знание абсолютных уровней информационных потоков не нужно, так как конечным результатом является их отношения. В режиме измерения коэффициента пропускания используется отношение уровня

прошедшего через лист светового потока к падающему, а в режиме оценки фотосинтетической активности - отношение разности максимальной и стационарной уровней флуоресценции (переменная флуоресценция) к максимальному уровню флуоресценции. При анализе данных будут использоваться относительные единицы, тем не менее, используемые фотоэлектрические датчики и аналого-цифровые преобразователи (АЦП) должны обеспечивать достаточную линейность преобразования свет - электрический сигнал.

В связи с этим была реализована так называемая относительная калибровка, когда выявляется линейный участок на передаточных характеристиках и остальные зоны пересчитываются с учетом линейного соотношения между изменением уровня входного сигнала и изменением показаний камеры. При этом пересчет производится не в единицы мощности светового потока, а в условные единицы показаний камеры, какие должны были бы быть, если бы использовался линейный фотоприемник с широким динамическим диапазоном. Уравнение перерасчета показаний камеры на участке от 1 до 225 условных единиц (рис. 3):

$$Y = -8.76 \cdot 10^{-7} X^4 + 3.33 \cdot 10^{-4} X^3 - 2,71 \cdot 10^{-3} X^2 + 1,556 \cdot X - 0.317 \quad (R^2=0.999)$$

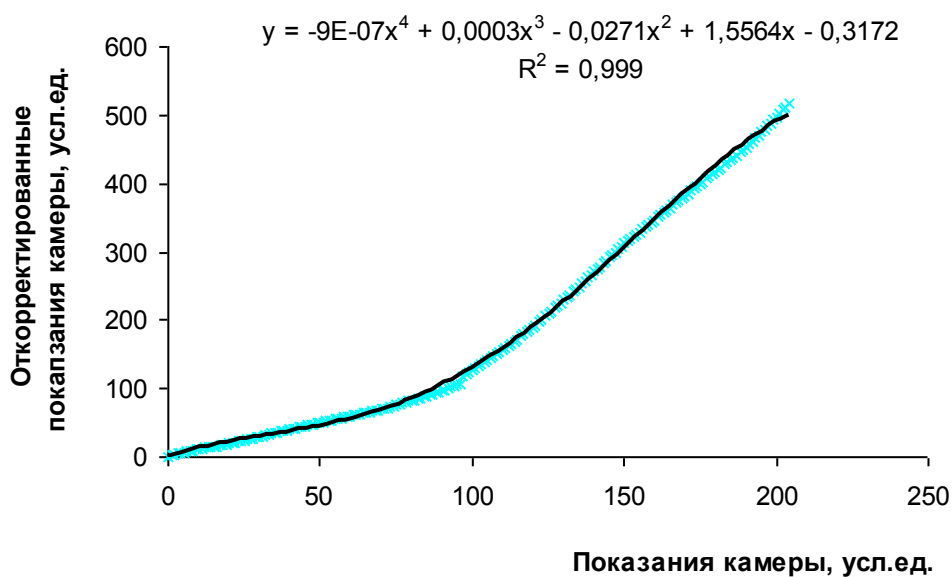


Рисунок 3 – График относительной калибровки показаний камеры

Проверена корректность относительной калибровки на примере измерений фотосинтетической активности листьев земляники на различных режимах «выдержка» и «усиление».

Таблица 1

Результаты перерасчета показаний фотосинтетической активности листьев земляники на фиксированной выдержке «-8» и на разных выдержках с использованием уравнения корректировки.

Выдержка	Пересчет			Выдержка	Пересчет		
	Fm	Fn	Y		Fm	Fn	Y
-8	78,93	17,59	0,7770	0	351,92	100,30	0,7149
-8	92,30	18,88	0,7955	-1	325,19	88,34	0,7283
-8	110,21	24,21	0,7803	-2	294,37	68,41	0,7675
-8	77,30	17,52	0,7733	-3	272,00	61,70	0,7731
-8	71,29	16,36	0,7704	-4	218,37	42,32	0,8061
-8	89,80	17,61	0,8038	-5	197,78	39,10	0,8022
-8	91,09	21,79	0,7607	-6	144,08	32,71	0,7729
-8	94,38	19,82	0,7899	-7	130,74	29,68	0,7729
-8	101,95	24,10	0,7636	-8	81,09	16,70	0,7940
-8	85,32	18,16	0,7871	-9	43,97	10,02	0,7719
-8	100,77	27,94	0,7227	-10	25,84	2,805	0,8914
Среднее	90,31	20,36	0,7750	Среднее	189,58	44,74	0,7814
Ошибка среднего	3,50	1,11	0,0066	Ошибка среднего	34,21	9,53	0,0138
Вариация, %	12,86	18,03	2,81	Вариация, %	59,85	70,66	5,87

Вероятность совпадения выборок значений фотосинтетической активности (параметр Y), измеренной на одной выдержке и на разных выдержках до и после корректировки составляет 0,6098 и 0,9791 соответственно, что убеждает в действенности относительной калибровки. Анализ результатов показывает, что наиболее корректные данные получаются при условии, что измеряемый сигнал будет составлять не менее, чем 8 усл. ед и не выше 140 усл.ед.

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. Том 5. № 1. 2022.

2. Будаговская О.Н. Экспериментальная оптимизация спектрального состава излучателей комбинированного оптического прибора для оценки функционального состояния листьев растений по критериям удельной фотосинтетической активности и относительному содержанию хлорофилла // Наука и Образование. Том 5. № 2. 2022.

3. Будаговская О.Н. Теоретический расчет интенсивностей зондирующих потоков комбинированного оптического прибора для оценки функционального состояния листьев растений по критериям удельной фотосинтетической активности и относительному содержанию хлорофилла // Наука и Образование. Том 5. № 3. 2022.

4. Будаговская О.Н. Исследование зависимости параметров медленной индукции флуоресценции хлорофилла и оптической проницаемости листьев растений от интенсивности зондирующего излучения // Наука и Образование. Том 5. № 4. 2022.

5. Будаговская О.Н. Фотометрическая калибровка веб-камер // Наука и Образование. Том 4. № 3. 2022.

UDC 62:535.8:634

**DESIGN OF AN OPTICAL INSTRUMENT FOR EVALUATION
FUNCTIONAL STATE OF PLANT LEAVES ACCORDING TO THE
CRITERIA OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY
AND THE RELATIVE CONTENT OF CHLOROPHYLL**

Olga N. Budagovskaya

doctor of technical Sciences, leading researcher Engineering Center

Federal research Center named after I. V. Michurin

Michurinsk State Agrarian University

budagovsky@mail.ru

Michurinsk, Russia

Annotation. A description of the design of a mock-up sample of an optical device for a comprehensive assessment of the functional state of plants according to the criteria of photosynthetic activity and the relative content of chlorophyll in one measuring cycle is given.

Keywords: photosynthetic activity, relative chlorophyll content, leaves, combined device, tests

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 30.06.2023.

The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 30.06.2023.