

УДК 62:535. 8:634

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
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, в.н.с.

budagovsky@mail.ru

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

Аннотация. Приведены результаты теоретического расчета оптимальной интенсивности излучателей в синей и красной спектральной областях, предназначенных для возбуждения флуоресценции и измерению оптической плотности листа. Данные предназначены для выбора типа излучателей при конструировании комбинированного оптического прибора для оценки функционального состояния листа по критериям фотосинтетической активности и относительному содержанию хлорофилла.

Ключевые слова: комбинированный прибор, интенсивность излучения, флуоресценция, оптическая плотность, фотосинтетическая активность, содержание хлорофилла, листья растений.

В работах [1, 2] было проведено обоснование конструктивного решения и спектрального состава излучателей 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 теоретический расчет оптимальной интенсивности излучателей, входящих в состав оптико-электронной схемы прибора, что является целью данной статьи.

Основной задачей при разработке такого оборудования является обеспечение согласования интенсивности и спектров излучения объектов со спектральными свойствами оптико-электронных элементов, особенно со спектральной чувствительностью фотоприемника $S(\lambda)$ с тем, чтобы обеспечить надежную регистрацию сигнала на уровне фоновых помех и шумов.

Расчет проведем исходя из предложенной в работе [1] рабочей схемы комбинированного прибора, в которой для оценки фотосинтетической активности используется эффект Каутского с регистрацией медленной индукции флуоресценции хлорофилла (МИФХ) в режиме отражения, а для оценки относительного содержания хлорофилла - оптическая плотность листа в красной области спектра, оцениваемая в режиме пропускания.

В первую очередь следует провести энергетическую оценку люминесцентной составляющей $F_{690..735}$, поскольку априори этот сигнал слабее оптического потока, связанного с относительным содержанием хлорофилла. Предположим, что в качестве объекта выступает интактный (живой) зрелый лист яблони с типовым содержанием фотосинтезирующих пигментов 7..15 мг/дм² [3].

Общая интенсивность люминесценции (P_l) определяется интенсивностью зондирующего потока первого излучателя (PI_0) степенью эффективного поглощения возбуждающего света $k_n(\lambda_{o1})$, квантовым выходом люминесценции φ , а также спектром возбуждения и испускания люминесценции:

$$P_l = k_n(\lambda_{o1})\varphi k_{mp}(\lambda_{o1}, \lambda_l)PI_0, \quad (1)$$

где $k_{mp}(\lambda_l)$ коэффициент трансформации энергетических величин в квантовые, зависящий от спектра возбуждения и испускания люминесценции.

Определим общий уровень флуоресцентного сигнала из предположения, что флуоресценция возбуждается синим светом на длине волны $\lambda_{o1} = 470$ нм, квантовый выход флуоресценции хлорофилла $\varphi = 0,03$ [4]; коэффициент поглощения на длине волны 470 нм $k_n(470) = 90\%$ [5], а интенсивность первого излучателя, возбуждающего флуоресценцию света $PI_0 = 800$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹.

Расчеты по формуле (1) показывают, что для заданных условий он составит около 21,6 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. Учитывая, что угол приема сигнала при любой конструкции прибора будет менее 5°, то на входную апертуру фотоприемного устройства попадет не более 0,3 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ квантов. При использовании оптической схемы с широкополосным светофильтром, имеющем коэффициент пропускания люминесцентного сигнала не менее 80% и с учетом потерь в оптическом тракте (4-8%), на долю информационного сигнала в диапазоне длин волн от 660 до 790 нм придется 0,1 - 0,24 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. Для того, чтобы понять, как это соотносится со спектральной чувствительностью потенциального фотоприемного устройства, следует перевести квантовый эквивалент излучения в энергетические величины с помощью формулы [6]:

$$I_{\text{Вт}} = I : Nhc/\lambda \quad (\text{моль} \cdot \text{с}^{-1}) \quad (2)$$

где N – число Авогадро; $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; h - Постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; c – скорость света, $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с; λ – длина волны регистрируемого излучения, $\lambda = 6,9 \cdot 10^{-7} \dots 7,4 \cdot 10^{-7}$ м.

Поскольку квантовый эквивалент светового потока с плотностью мощности 1 Вт·м⁻² и длиной волны 690 нм составляет 5,77 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, а для 740 нм – 5,38 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, то на фотоприемник попадет поток с плотностью мощности не менее 1,2 мВт·м⁻². Этот уровень лежит в пределах чувствительности бюджетных фотодиодов, цифровых и аналоговых видеокамер.

Основным критерием при оптимизации параметров источников зондирующего излучения является условие не только надежного приема информационных сигналов, но и согласование их интенсивности с рабочим диапазоном фотоприемника. Это необходимо для того, чтобы оценка и фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла осуществлялась одной и той же оптико-электронной схемой с минимальными настройками режимов. Поэтому для расчета необходимой мощности второго излучателя примем, что интенсивность потока, прошедшего через лист красного излучения примерно равен расчетному уровню интенсивности флуоресцентного сигнала ($0,3 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ квантов). Длину волны второго излучателя примем равной 630 нм. Уровень второго информационного сигнала на входе фотоприемника в свою очередь, определится исходной мощностью зондирующего излучения P_0 , эффективностью светосбора рассеянного объектом излучения $K_{эс}$, уровнем потерь на всех элементах оптического тракта $K_{ном}$, коэффициентом пропускания излучения $K_{2\lambda}$ объектом. Тогда:

$$(1 - K_{ном}) \cdot K_{2\lambda} \cdot K_{эс} \cdot P_0 \approx 0,3 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \quad (3)$$

Эффективность светосбора будет определяться: индикатрисой рассеяния объекта, углом приема α_{np} , углом между нормалью к светочувствительной площадке приемника и направлением распространения зондирующего пучка Θ , входной апертурой фоторегистратора. Предположим, что лист испускает прошедшее сквозь него излучение диффузно, равномерно во всех направлениях с углом 180° , а фотоприемник расположен перпендикулярно оси распространения пучка, т.е. $\cos\Theta = 1$. Тогда коэффициент эффективности светосбора будет зависеть только от угла приема оптической схемы α_{np} , которая определяется диаметром входной апертуры (d_a) и ее удалением от объекта (L):

$$K_{эс} = \alpha_{np}/180^\circ = \arctg(d_a/L)/180^\circ. \quad (4)$$

При типовом диаметре входной апертуры фотоприемника 5-8 мм и наиболее его вероятном удалении от объекта 80-150 мм, эффективность светосбора составит не менее 0,8 %. Потери оптического тракта в основном

будут определяться коэффициентом поглощения широкополосного светофильтра на выбранной длине волны, который примем равным 20 %.

Подставив все указанные параметры в уравнение (3), получим:

$$0,064 \cdot K_{2\lambda} \cdot P_o \geq 0,3 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, P_o \geq 4,68 / K_{2\lambda} \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \quad (5)$$

Таким образом, подбор интенсивности источника 2 зависит от коэффициента пропускания листа. Сделаем расчет для наибольшего из возможных коэффициентов поглощения листа – 99 % (наихудшие условия приема информационного сигнала). Тогда для комбинированных измерений необходимо обеспечить плотность мощности второго излучателя не менее $470 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что при переводе в энергетические величины по формуле (2) означает, что излучатель 2 должен сформировать на поверхности объекта измерений плотность мощности более $86,2 \text{ Вт/м}^2$. При диаметре пучка 3-5 мм мощность излучателя должна быть в диапазоне 0,6 -1,7 мВт, что соответствует параметрам так называемых маломощных светодиодов с током накачки до 20 мА.

Аналогичные расчеты мощности синего излучателя 1 показали, что и для возбуждения флуоресценции также можно использовать синие светодиоды низкой мощности 1,4-3,2 мВт с рабочими токами до 30 мА.

Поскольку прибор предназначается для оценки относительного содержания хлорофилла в листьях с самой разной его концентрацией и соответственно, варьированием оптической плотности в широких пределах, то в конструкции прибора необходимо заложить функцию перестраиваемой плотности мощности излучателей, особенно на этапе испытаний и настройки. Использование этой опции будет корректной только в том случае, если будет известна зависимость выходной мощности излучателя от тока инъекции или так называемая ватт-амперная характеристика и с ее помощью выбран линейный рабочий участок управления интенсивностью излучателей. Немаловажно также определить зависимость основных измеряемых параметров от плотности мощности зондирующего излучения.

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. Т. 5. 2022. №1.
2. Будаговская О.Н. Экспериментальная оптимизация спектрального состава излучателей комбинированного оптического прибора для оценки функционального состояния листьев по критериям удельной фотосинтетической активности и относительному содержанию хлорофилла // Наука и образование. Т. 5. 2022. №2.
3. Шишкану Г.В. Фотосинтез яблони. Кишинев: Штиинца. 1973. 292 с.
4. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence - a practical guide // J. Exp. Bot. 2000. Vol. 51, № 345. P. 659-668.
5. Использование спектроскопии отражения в анализе пигментов высших растений / М.Н. Мерзляк, А.А. Гительсон, О.Б. Чивкунова, А.Е. Соловченко, С.И. Погосян // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 5. С. 785 - 792.
6. Hart J.W. Light and plant growth. London: Unwin Hyman. 1988. 206 s.

UDC 62:535. 8:634

**THEORETICAL CALCULATION OF OPTIMAL INTENSITY
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, leading researcher Engineering Center

budagovsky@mail.ru

Federal research Center named after I. V. Michurin
Michurinsk State Agrarian University
Michurinsk, Russia

Annotation. The results of the theoretical calculation of the optimal intensity of emitters in the blue and red spectral regions designed to excite fluorescence and measure the optical density of the sheet are presented. The data are intended for selecting the type of emitters when designing a combined optical device for assessing the functional state of leaves according to the criteria of specific photosynthetic activity and relative chlorophyll content.

Keywords: combined device, radiation intensity, fluorescence, optical density, photosynthetic activity, chlorophyll content, plant leaves.

Статья поступила в редакцию 12.09.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 20.10.2022.

The article was submitted 12.09.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 20.10.2022.