

УДК 62:535.8:634

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ  
ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО  
СОСТОЯНИЯ ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ ПО КРИТЕРИЯМ  
ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ  
И ОТНОСИТЕЛЬНОМУ СОДЕРЖАНИЮ ХЛОРОФИЛЛА**

**Ольга Николаевна Будаговская**

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

[budagovsky@mail.ru](mailto:budagovsky@mail.ru)

Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

**Аннотация.** Приведено обоснование конструктивного решения комбинированной оптико-электронной аппаратуры для диагностики функционального состояния растений, объединяющей оценку фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла за один измерительный цикл.

**Ключевые слова:** комбинированный прибор, фотосинтетическая активность, содержание хлорофилла, листья растений.

По мере роста населения, развития промышленности и оттока рабочей силы из сельскохозяйственного производства, а также вследствие сокращения пахотных земель, все более актуальным становится получение максимального количества продукции на единицу затрачиваемой невозобновимой энергии. Переход к прецизионному (точному) земледелию является естественным этапом развития энерго-ресурсосберегающей и экологически безопасной стратегии современного сельскохозяйственного производства. Такое земледелие, в отличие от традиционного, использует для принятия решений и выполнения сельскохозяйственных операций современные информационные технологии сбора, обработки и анализа данных о функциональном состоянии растений и их среды обитания.

Наибольшее внимание при этом уделяется двум важнейшим параметрам функционального состояния растений – активности фотосинтетических функций и концентрации хлорофилла. От них не только зависит урожайность - доказано, что эти параметры реагируют на условия выращивания и поэтому служат чувствительными индикаторами продуктивности, устойчивости, обеспеченности макро и микроэлементным питанием, зараженности вредителями и болезнями.

В последнее время все большее распространение получают неинвазивные методы диагностики. Они предоставляют возможность изучать поведение растений в режиме реального времени, в процессе функционирования, изучать переходные процессы, которые более информативны для анализа сложных динамических объектов с большим числом положительных и отрицательных обратных связей. Благодаря разработке и широкому внедрению недорогих источников и цифровых приемников видеoinформации, новейшие технические разработки приборов и оборудования диагностики живых организмов лежат в области оптико-электронных компьютеризированного оборудования. В связи с этим решение поставленной задачи необходимо искать в области оптических методов исследования.

Известны специализированные полевые приборы, оценивающие относительное содержание хлорофилла: «Spectrum1000» (Великобритания);

«CCM 200» (ADC BioScientific Ltd, Великобритания), серия OS (Opti-Sciences, Inc., США); «SPAD-501», «SPAD-502» (Minolta, Япония); «N-sensor» (Yara, США) и «N-tester» (Hydro Agri, США) [1-6].

Принцип их работы основан на оценке степени ослабления оптического сигнала листом в красной или зеленой областях спектра (измеряется в режиме пропускания или отражения). Поскольку содержание хлорофилла тесно связано уровнем потребления азота и накоплением сухого вещества в растении, то данные приборы успешно и широко применяются для контроля азотного питания, урожайности и содержания белка различных сельскохозяйственных культур [1-5].

Налажен выпуск приборов для измерения фотосинтетической активности на базе эффекта Каутского: OS (США); PAM (Heinz Walz, Германия), PPM (EARS, Голландия), «SPAD» (Япония) «CCM» (Великобритания) и продукция фирм Hansatech Instruments, (Англия); LI-COR (Международная корпорация); Qubit System Inc (Канада), «Spectrum» (Великобритания).

Даже внешний вид приборов демонстрирует принципиальную возможность и целесообразность объединения функций. Тем не менее, анализ патентной и научной литературы, рекламной информации на Интернет-сайтах показал, что ни России, ни за рубежом нет оптического оборудования, способного одновременно, за один измерительный цикл оценивать как фотохимическую активность, так и содержание хлорофилла. В результате приходится использовать два различных метода и типа оборудования. Это приводит к резкому увеличению трудоемкости и длительности измерений. В результате исследователю приходится уменьшать объем выборки и тем самым снижать достоверность выводов.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное обоснование основных элементов проектирования комбинированной оптико-электронной аппаратуры количественной оценки функционального состояния растений, объединяющей оценку фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла за один измерительный цикл.

Для выбора оптимальной конструкции комбинированного прибора на первом этапе были проанализированы типовые, самых распространенные модели хлорофиллометров и хлорофилл-флуориметров (рис. 1 и рис. 2).



Рисунок 1 - Общий вид хлорофиллометров: А) SPAD-502; Б) CCM-300

Следует отметить общность подходов в конструктивных решениях. В первую очередь, это наличие прижима - фиксатора для листьев, чаще всего со встроенными излучателями или со световодом, подводящим зондирующее излучение [3, 7]. Как правило, прибор разбит на две части: измерительный модуль и блок обработки данных, в качестве которого используется или микроконтроллеры или портативные компьютеры. В некоторых моделях, предназначенных для работы в полевых условиях, и измерительная головка и электронные блоки обработки и индикации данных встроены в единый корпус. Режим работы: в приборах для оценки концентрации хлорофилла, как правило, измеряется интенсивность прошедшего через лист излучения (1-4 длины волны), а в приборах для определения фотосинтетической активности методом флуоресценции хлорофилла – отраженный сигнал (1-2 длины волны). Анализ спектральных параметров оборудования выявил, что если для решения проблемы оптического анализа концентрации хлорофилла можно наблюдать некоторое разнообразие подходов, использующих различные оптические методы – и флуоресцентные, и колориметрические, и спектральные, работающие в диапазоне длин волн от 400 до 980 нм (таблица 1), то оптическая диагностика фотосинтетической активности ограничена только одним приемом

– эффектом индукции флуоресценции хлорофилла с определенным спектральным диапазоном информационного сигнала – в области 690 и 740 нм [7-9]. Для возбуждения флуоресценции используются интенсивные световые потоки в спектральных диапазонах максимального поглощения хлорофилла (синяя или красная области спектра) [7, 8].

**FluorPen** Qubit Systems



**PAM-2000** Heinz Walz GmbH



**PAM-2500** Heinz Walz GmbH



**OS 30p**  
Opti-Sciences Inc.



**Handy Fluorcam Z400**  
(Qubit Systems,



**EARS PPM**  
EARS



**CF Imager**  
Technologica Ltd



**LI-6400XT** LI-COR  
Biosciences



**HAN.FMS2**  
Hansatech Instruments



*Рисунок 2 - Переносные хлорофилл-флуорометры ведущих фирм мира. Использованы фотографии с сайтов фирм-производителей продукции*

Спектральный диапазон информационного оптического потока, использующегося в  
хлорофиллометрах

Оптические методы неинвазивной диагностики относительного содержания хлорофилла	Спектральный диапазон информационного сигнала
Колориметрические методы: цветовые индексы RGB, XYZ, L*a*b*	Красный – 620...660 нм Зеленый – 530...560 нм Синий – 450...470 нм
Спектры отражения и пропускания видимой области спектра	400...800 нм; 525 - 680 нм
Коэффициенты пропускания	660 нм и 940 нм; 620 нм и 940 нм; 720 нм и 820 нм
Коэффициенты отражения	550 нм, 650 нм, 780 нм
Отношение интенсивности флуоресценции хлорофилла	690/740 нм
Интенсивность флуоресценции хлорофилла	670 – 760 нм

В связи с этим в качестве базовой для схемы будущего комбинированного прибора следует использовать оптический тракт измерения флуоресцентного сигнала с такой модификацией, которая давала бы возможность также дополнительно регистрировать оптические сигналы, коррелирующие с относительным содержанием хлорофилла. Для этого предполагается использование двух источников зондирующего сигнала, источник 1 служит для регистрации относительного содержания хлорофилла и работает в режиме пропускания, а источник 2 служит для возбуждения флуоресценции и работает в режиме отражения. Излучение источников 1 и 2 падает на одну и ту же зону листа. Сигналы флуоресценции и светорассеяния направляются в один и тот же оптический тракт и попадают на фотоприемник через широкополосный светофильтр, отсекающий излучение источника 2, пропускающий на длине волны источника 1 и пропускающий на некоторой длине волны из диапазона флуоресценции хлорофилла (или на всех). На этапе макетного проектирования оптимальным будет использование полосового светофильтра с зоной

максимального пропускания в диапазоне длин волн от 540 до 800 нм. Измерения начинаются с включения источника 1 и оценки относительного содержания хлорофилла. Длительность первого цикла и интенсивность излучателя 1 минимальные. Эти параметры, а также спектральный состав излучателя нуждаются в экспериментальной оптимизации. Затем отключается источник 1 и включается источник 2 – происходит измерение фотосинтетической активности. Длительность второго цикла, спектр излучения и интенсивность источника 2 в дополнительной оптимизации не нуждаются и будут использованы типовые для такого рода измерений параметры, а именно: спектр излучения -  $470 \pm 15$  нм, интенсивность: от 200 до  $1500 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , длительность – от 30 до 600 с (до выхода флуоресцентного сигнала на стационарный уровень).

#### **Список литературы:**

1. Olivier M., Goffart J.P., Legent J.P. Threshold value for chlorophyll meter as decision tool for nitrogen management of potato // *Agronomy J. Madison*. 2006. V. 98, № 3. P. 496 - 506.
2. Swiader J., Moor A. SPAD-chlorophyll response to nitrogen fertilization and evaluation of nitrogen status in dryland and irrigated pumpkins // *J. Plant Nutr.* 2002. V. 25. № 5. P. 1089 - 1100.
3. Relationship between chlorophyll content in leaves of sorghum and pigeonpea determined by extraction method and chlorophyll meter SPAD-502 / A. Yamamoto, T. Nakamura, J. Adu-Gyamfi, M. Saigusa // *J. Plant Nutr.* 2002. V. 25. № 10. P. 2295 – 2301.
4. Duru M. Evaluation of chlorophyll meter to assess nitrogen status of cocksfoot sward // *J. Plant Nutr.* 2002. V. 25. № 2. P. 275 - 286.
5. Samborski S., Kozak M., Rozbicki J. The usefulness of chlorophyll meter SPAD-502 for winter triticale grain yield estimation // *Folia Univ. Agr. Stetin*. 2006. № 100. P. 157 - 162.

6. Singh J.P., Rachna L.S., Panigrahy S. Using leaf chlorophyll meter for N-fertilizer management in precision farming of potato // J. Indian Potato Assn. 2007. V. 34. № 3-4. P. 221 - 226.

7. Portable fluorometer RAM-2000 and data acquisition software DA-2000. Handbook of operation with examples of practical applications. - Heinz Walz GmbH, Germany, 2005. 199 p.

8. Baker N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo // Annu. Rev. Plant Biol. 2008. V.59. P. 89–113.

9. 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.

**UDC 62:535.8:634**

**DEVELOPMENT OF A COMBINED OPTICAL DEVICE FOR  
ASSESSING THE FUNCTIONAL STATE OF PLANT LEAVES  
ACCORDING TO THE CRITERIA OF SPECIFIC PHOTOSYNTHETIC  
ACTIVITY AND RELATIVE CHLOROPHYLL CONTENT. PART 1.  
PROBLEM STATEMENT, JUSTIFICATION OF THE DESIGN SOLUTION  
OF THE DEVICE**

**Olga N. Budagovskaya**

Doctor of Technical Sciences, leading Researcher Engineering Center

[budagovsky@mail.ru](mailto:budagovsky@mail.ru)

Federal research Center named after I. V. Michurin

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

**Annotation.** The substantiation of the constructive solution of the combined optoelectronic equipment for the diagnosis of the functional state of plants,

combining the assessment of photosynthetic activity and the relative content of chlorophyll in one measuring cycle, is given.

**Key words:** combined device, photosynthetic activity, chlorophyll content, plant leaves.

Статья поступила в редакцию 14.02.2022; одобрена после рецензирования 12.03.2022; принята к публикации 25.03.2022. The article was submitted 14.02.2021; approved after reviewing 12.03.2022; accepted for publication 25.03.2022.