

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ СТРЕССОВЫХ СОСТОЯНИЙ РАСТЕНИЙ

Ю.В. Федотов

fed@bmstu.ru

О.А. Булло

ekomonit@bmstu.ru

М.Л. Белов

belov@bmstu.ru

В.А. Городничев

gorod@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработан лазерный флуоресцентный метод обнаружения стрессовых состояний растений. Для волны возбуждения флуоресценции длиной 532 нм приведены результаты экспериментальных исследований спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в нормальном и разных стрессовых состояниях, вызванных наличием в почве загрязнителей (соли, железного и медного купороса), недостаточным или избыточным поливом растений, механическими повреждениями листьев и корневой системы. Выполнен сравнительный анализ вариантов выбора спектральных диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения растений. Показано, что для задачи контроля состояний растений наиболее эффективными (с точки зрения надежности правильного обнаружения стрессовых состояний) диапазонами регистрации флуоресцентного излучения являются спектральные диапазоны с центральными длинами волн 685 и 740 нм

Ключевые слова

Лазерный метод, лазерно-индуцированная флуоресценция, контроль состояния растений

Поступила в редакцию 02.06.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 1965/14)

Введение. В настоящее время лазерные методы широко используются в различных областях науки и техники. Перспективным направлением использования лазерных методов является дистанционный контроль состояния растений, основанный на регистрации лазерно-индуцированной флуоресценции [1–14].

Недостаточное или избыточное количество воды в почве, недостаток питательных веществ, болезни растений, наличие загрязнителей в почве и другие факторы приводят к невозможности нормального роста растений (стрессовым ситуациям). На ранних стадиях такие стрессовые состояния сложно обнаружить по внешнему виду растений. Поэтому важным является разработка методов и приборов обнаружения стрессовых состояний растений, как индикаторов неблагоприятных внешних факторов.

Физической основой лазерных флуоресцентных методов контроля состояния растений является изменение спектра лазерно-индуцированной флуоресценции растений в стрессовом состоянии (по сравнению со спектром растения в нормальном состоянии).

Основной составляющей флуоресцентного излучения живого листа растения в нормальном состоянии является флуоресценция хлорофилла [15]. Для растения в стрессовом состоянии процесс фотосинтеза нарушается и спектр лазерно-индуцированной флуоресценции изменяется. Однако окончательной ясной картины происходящих процессов на сегодняшний день нет [16].

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам лазерно-индуцированной флуоресценции различных растений в нормальном и стрессовом состоянии при длинах волн возбуждения флуоресценции от 266 до 635 нм.

Лазерный анализатор, предназначенный для контроля состояния растений, облучает растительность на длине волны возбуждения флуоресценции и регистрирует характеристики лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения.

Перспективным вариантом лазерного анализатора, предназначенного для дистанционных измерений (например, с беспилотного летательного аппарата), является лазерный флуориметр, принимающий флуоресцентное излучение в двух узких спектральных диапазонах и проводящий тематическую обработку данных измерений для построения карт состояния растительности вдоль трассы полета носителя (в настоящее время реальными для лазерного флуориметра являются высоты полета порядка 100 м).

Анализ публикаций показывает, что в большинстве работ рекомендуют проводить измерение в узких спектральных диапазонах около двух центральных длин волн 680...690 нм и 730...740 нм, а в качестве информативного признака для обнаружения стрессовых состояний растений использовать отношение интенсивностей в этих двух спектральных диапазонах.

Несмотря на то, что число публикаций, посвященных экспериментальным исследованиям спектров флуоресценции растительности и задаче обнаружения стрессовых состояний растений, достаточно велико, остаются неясными некоторые важные вопросы, одним из которых является вопрос о выборе наиболее эффективной (для задачи обнаружения стрессовых состояний растений) пары спектральных диапазонов для регистрации флуоресцентного излучения растений.

Работа посвящена экспериментальным исследованиям спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в нормальном и стрессовом состояниях и определению на основе данных измерений наиболее эффективной пары спектральных диапазонов регистрации флуоресценции для задачи обнаружения стрессовых состояний растений. В экспериментах использовалась длина волны возбуждения лазерно-индуцированной флуоресценции 532 нм (из-за большой эффективности возбуждения флуоресценции на этой длине волны).

Такие исследования представляют практический интерес для разработчиков лазерной аппаратуры контроля состояния растений по результатам дистанционного измерения флуоресценции растений.

Лабораторная установка для проведения экспериментов. Для измерения спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в нормальном и стрессовом состояниях была создана лабораторная установка, функциональная схема которой показана на рис. 1.

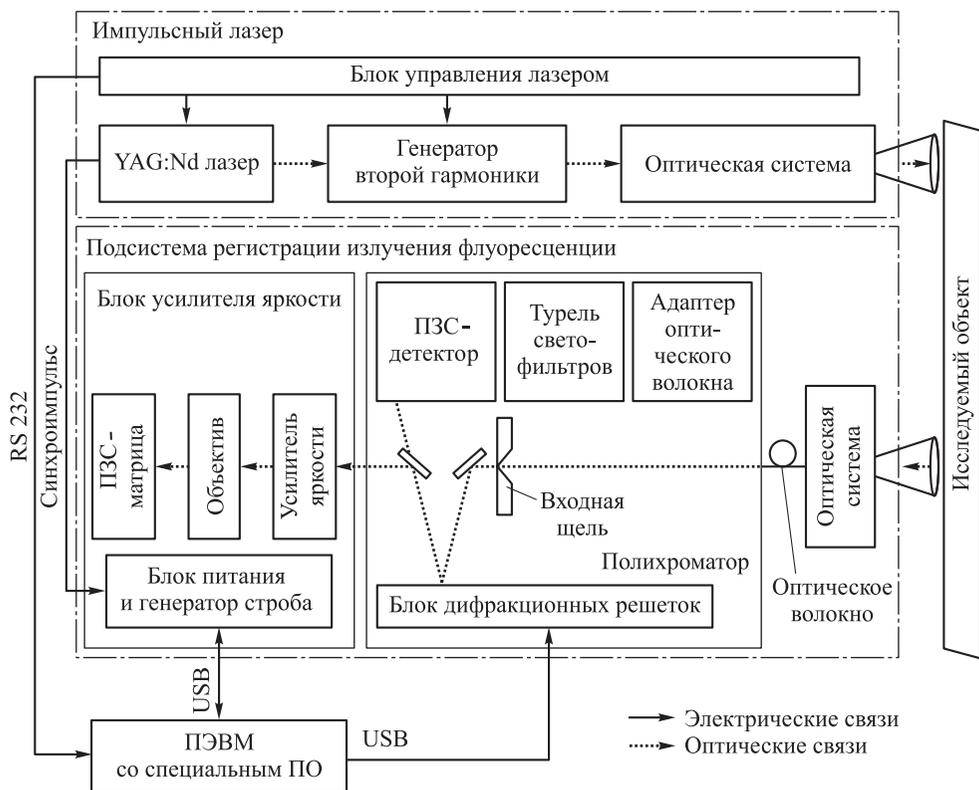


Рис. 1. Функциональная схема лабораторной установки

В качестве лазера для возбуждения флуоресценции был использован YAG:Nd лазер Ekspla NL204 с длиной волны 1064 нм с диодной накачкой и удвоением частоты.

Лазерно-индуцированное излучение флуоресценции собирается приемной оптической системой и вводится в оптическое волокно.

Система регистрации флуоресцентного излучения построена на основе полихроматора и высокочувствительного матричного детектора с усилителем яркости.

Полихроматор полностью автоматизирован: смена решеток, оптических фильтров, выбор ширины входной щели осуществляется автоматически.

Спектр лазерно-индуцированной флуоресценции регистрируется высокочувствительной ПЗС-матрицей с усилителем яркости; ПЗС-детектор преобразует изображение в цифровой массив и передает этот массив на компьютер.

Для управления лабораторной установкой использовалось специально разработанное в среде визуального программирования LabVIEW программное обеспечение.

Параметры лабораторной установки

Энергия импульса возбуждения флуоресценции, мДж	2,1
Длительность импульса лазера, нс	<7
Длина волны возбуждения флуоресценции, нм	532
Частота повторения импульсов, Гц	до 500
Разрешение по спектру, нм	8
Диаметр приемной оптической системы, мм	15
Расстояние от оптической системы до растений, м	~1

На установке были проведены измерения спектров флуоресценции растений в диапазоне 595...800 нм. Перед проведением экспериментов на лабораторной установке выполнялась калибровка оборудования (калибровка полихроматора по длине волны по стандартной методике на трех длинах волн 253,65 нм, 435,85 нм и 696,54 нм; калибровка системы регистрации по чувствительности в диапазоне от 250 до 750 нм по стандартной методике с использованием калиброванного источника света DH2000-CAL).

Результаты экспериментов. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции проводились для разных видов растений, которые находились как в нормальном, так и в разных стрессовых состояниях.

Во время измерений образцы растений ставились так, чтобы лазерное излучение попадало на листья образцов, которые находились приблизительно на одной высоте, и не попадало на грунт. Диаметр лазерного пятна на исследуемом образце растения составлял приблизительно 2,5 см.

На рис. 2 для примера приведены измеренные характерные спектры флуоресценции кресс-салата в нормальном (кривые 1, 2) и стрессовом (кривые 3, 4 после обрезания листьев) состояниях. Видно, что спектр флуоресценции растения имеет два максимума — в диапазонах 680...690 нм и 730...740 нм, однако соотношение этих максимумов зависит от состояния растения.

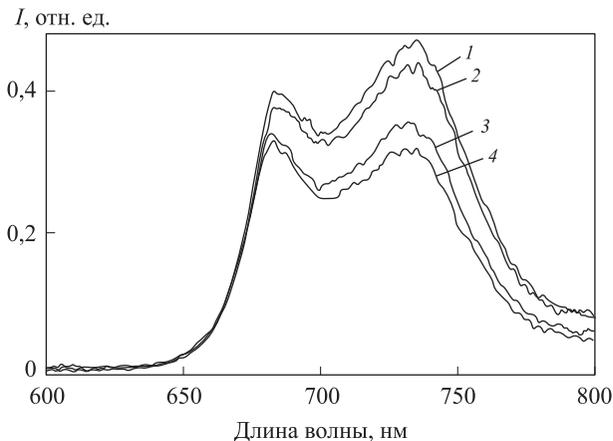


Рис. 2. Спектры флуоресценции кресс-салата в нормальном (1, 2) и стрессовом (3, 4) состояниях

В различных публикациях, посвященных лазерному флуоресцентному методу контроля состояния растений, регистрация флуоресцентного излучения проводится в узких спектральных диапазонах (около двух центральных длин волн: одна длина волны λ_1 в диапазоне 680...690 нм, другая λ_2 — в диапазоне 730...740 нм) и в качестве информативного признака для обнаружения стрессовых состояний растений используется отношение $R = I(\lambda_1)/I(\lambda_2)$ интенсивностей флуоресценции $I(\lambda)$, регистрируемых в следующих спектральных диапазонах: $R_{680/740} = I(680)/I(740)$, $R_{685/740} = I(685)/I(740)$, $R_{680/730} = I(680)/I(730)$, $R_{685/730} = I(685)/I(730)$, $R_{690/740} = I(690)/I(740)$, $R_{690/735} = I(690)/I(735)$, $R_{685/735} = I(685)/I(735)$ при ширине спектральных диапазонов (около центральных длин волн) от 5 до 20 нм.

Иногда используется регистрация флуоресцентного излучения и при большой ширине спектральных диапазонов:

$$R_{680-712/712-750} = \frac{\int_{680}^{712} I(\lambda) d\lambda}{\int_{712}^{750} I(\lambda) d\lambda}.$$

В работе при обработке результатов измерения использовались отношения R интенсивности флуоресценции на двух длинах волн: $R_{680/740}$, $R_{685/740}$, $R_{680/730}$, $R_{685/730}$, $R_{690/740}$, $R_{690/735}$, $R_{685/735}$ при ширине спектральной полосы регистрации 10 нм, а также $R_{680-712/712-750}$.

Измерения проводились для различных растений и стрессов, вызванных разными причинами: внесением в почву загрязнителей, избыточным или недостаточным поливом растений, механическими повреждениями растений — смятием или обрезанием листьев, обрезанием корней растений.

На рис. 3–6 приведены примеры результатов обработки измеренных спектров флуоресценции.

На рис. 3 приведены примеры результатов обработки спектров флуоресценции для газонной травы (из газонной смеси Декор Aros) в нормальном и стрессовых состояниях, вызванных добавлением в почву NaCl (5 г на каждый образец, габаритные размеры горшка, в который высаживался один образец, 9×9×10 см) (см. рис. 3, а) и медного купороса CuSO₄ (5 г, разбавленные в 200 мл воды на 3 образца) (см. рис. 3, б). Измерения проводились через 4 недели после внесения в почву загрязнителей.

Примеры результатов обработки спектров флуоресценции для кресс-салата в нормальном и стрессовых состояниях, вызванных обрезанием листьев и избыточным поливом растений в течение 24 дней, приведены на рис. 4, а, б. Измерения спектров флуоресценции при механических повреждениях проводились в интервале времени от 20 до 40 мин после механического повреждения. При избыточном поливе корни растения находились постоянно в переувлажненной почве.

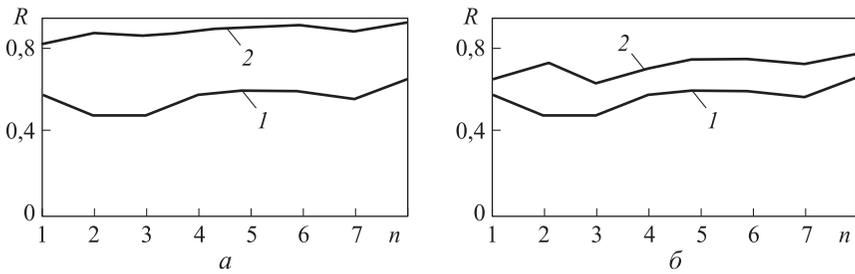


Рис. 3. Отношения R для газонной травы в нормальном состоянии (1) и стрессовом (2), вызванном добавлением в почву соли (а) и медного купороса (б)

На рис. 3, 4 показаны средние (по серии измерений для каждого растения и каждого вида стресса, размер серии измерений в среднем ~ 10 , всего около 200 спектров) значения R для стрессового (кривые 2) и для нормального (кривые 1) состояний. По горизонтальной оси отложен номер используемого отношения R : 1 — $R_{680/740}$, 2 — $R_{685/740}$, 3 — $R_{680/730}$, 4 — $R_{685/730}$, 5 — $R_{690/740}$, 6 — $R_{690/735}$, 7 — $R_{685/735}$, 8 — $R_{680-712/712-750}$.

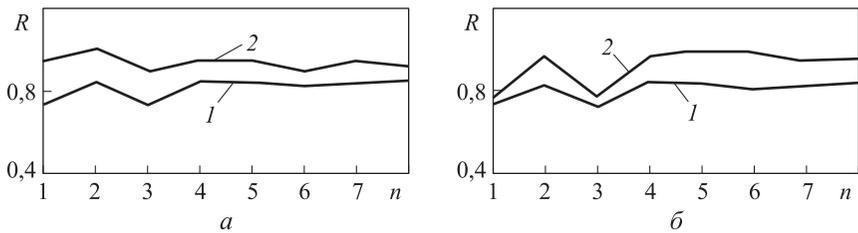


Рис. 4. Отношения R для кресс-салата в нормальном (1) состоянии и стрессовом (2), вызванном обрезанием листьев (а) и избыточным поливом в течение 24 дней (б)

Из рис. 3, 4 следует, что для приведенных примеров значения R при стрессовом состоянии растений всегда больше значений R при нормальном состоянии растений. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что не все равно какие спектральные диапазоны регистрации флуоресцентного излучения использовать при обработке.

За критерий эффективности выбора пары спектральных диапазонов (для регистрации флуоресцентного излучения в задаче обнаружения стрессовых состояний растений) естественно взять разность значений R для стрессового и нормального состояний одного и того же растения (надежность правильного обнаружения стрессовых состояний в условиях шумов и ошибок измерения будет тем выше, чем выше эта разность).

На рис. 5 приведены суммарные результаты обработки 12 серий измерений для разности ΔR величин R для стрессового и нормального состояний одного и того же растения. Семь серий измерений для кресс-салата при стрессовых состояниях, вызванных, соответственно, примятием, обрезанием листьев, повреждением корневой системы растения, избыточным поливом растений в течение 11, 17 и 24 дней,

отсутствием полива в течение 11 дней. Пять серий измерений для газонной травы при стрессовых состояниях, вызванных добавлением в почву разных загрязнителей — медного CuSO_4 и железного FeSO_4 купороса, соли NaCl . Для CuSO_4 измерения проводились через 4 недели после внесения в почву, для FeSO_4 и NaCl измерения проводились через 2 и 4 недели после внесения в почву.

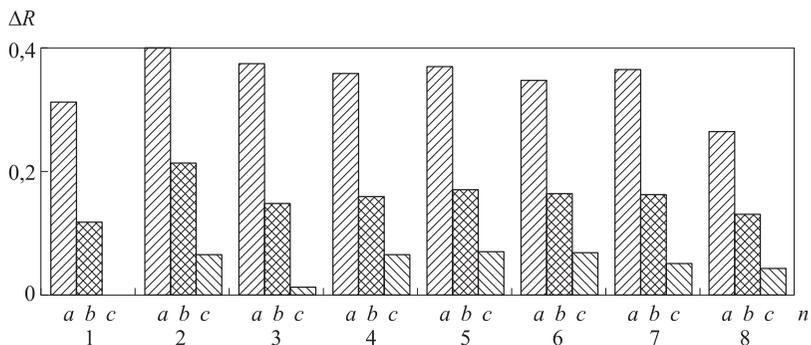


Рис. 5. Значения ΔR для стрессового и нормального состояний растений

На рис. 5 горизонтальная ось соответствует горизонтальным осям на рис. 3, 4, а по вертикальной оси отложена величина ΔR — максимальное, среднее и минимальное (по всем 12 сериям измерений) значения разности R для стрессового и нормального состояний растений для каждого из вариантов выбора спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения.

Из рис. 5 следует, что как максимальное, так и среднее значения ΔR являются наибольшими для отношения $R_{685/740}$, а минимальное значение ΔR для отношения $R_{685/740}$ является одним из наибольших. При этом максимальное значение $\Delta R_{685/740}$ может на 50 % превышать ΔR для других вариантов, а среднее значение $\Delta R_{685/740}$ — почти в 2 раза.

Выводы. Для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм выполнены экспериментальные исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в нормальном и различных стрессовых состояниях, вызванных наличием в почве загрязнителей, недостаточным или избыточным поливом растений, а также механическими повреждениями растений разного типа. Сравнительный анализ различных вариантов выбора спектральных диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения растений показывает, что для задачи контроля состояния растений наиболее эффективными (с точки зрения надежности правильного обнаружения стрессовых состояний) диапазонами регистрации флуоресцентного излучения являются спектральные диапазоны с центральными длинами волн 685 и 740 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Panneton B., Guillaume S., Roger J.M., Samson G. Discrimination of corn from monocotyledonous weeds with ultraviolet (UV) induced fluorescence // Applied Spectroscopy. 2011. Vol. 65. No 1. P. 10–19. DOI: 10.1366/10-06100
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1366/10-06100>

2. *Water deficit and salt stress diagnosis through LED induced chlorophyll fluorescence analysis in Jatropha curcas L. oil plants for biodiesel* / A.S. Gouveia-Neto, E.A. da Silva, R.A. Oliveira, P.C. Cunha, E.B. Costa, T.J.R. Câmara, L.G. Willadino // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 7902. P. 79020A-1-79020A-10. DOI: 10.1117/12.872991
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=718967>
3. *Лабораторные и лидарные измерения спектральных характеристик листьев березы в различные периоды вегетации* / А.В. Афонасенко, А.И. Иглакова, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, В.Е. Прокопьев // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 3. С. 237–243.
4. *Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Устойчивость результатов лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений* // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 80–84.
5. *Panneton B., Guillaume S., Roger J.M., Samson G. Improved discrimination between monocotyledonous and dicotyledonous plants for weed control based on the blue-green region of Ultraviolet-induced fluorescence spectra* // Applied Spectroscopy. 2010. Vol. 64. No. 1. P. 30–36. DOI: 10.1366/000370210790572106
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1366/000370210790572106>
6. *Zhi-qiang C., Wen-li C. Effects of NaCl on photosynthesis in Arabidopsis and Thellungiella leaves based on the fluorescence spectra, the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis and the delayed fluorescence technique* // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7568. P. 756822-1-756822-8. DOI: 10.1117/12.841257
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=780701>
7. *Plant abiotic stress diagnostic by laser induced chlorophyll fluorescence spectral analysis of in vivo leaf tissue of biofuel species* / A.S. Gouveia-Neto, E.A. da Silva, L.M.H. Silva, E.B. da Costa, T.J.R. Câmara, L.G. Willadino // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7568. P. 75680G-1-75680G-8. DOI: 10.1117/12.839462
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=780574>
8. *Grishaev M.V., Sal'nikova N.S. A Setup for remote recording of the spectrum of laser-induced fluorescence from crowns of woody plants* // Instruments and Experimental Techniques. 2010. Vol. 53. No. 5. P. 746–749. DOI: 10.1134/S0020441210050246
URL: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0020441210050246>
9. *Laser-induced fluorescence characteristics of vegetation by a new excitation wavelength* / J. Yanga, W. Gong, S. Shia, L. Dua, J. Suna, S. Songe // Spectroscopy Letters. 2016. Vol. 49. No. 4. P. 263–267. DOI: 10.1080/00387010.2016.1138311
URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00387010.2016.1138311>
10. *Hedimbi M., Singh S., Kent A. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants* // Natural Science. 2012. Vol. 4. No. 6. P. 395–401. DOI: 10.4236/ns.2012.46054
URL: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=19977>
11. *Saito K. Plant and vegetation monitoring using laser-induced fluorescence spectroscopy* // Industrial Applications of Laser Remote Sensing. 2012. P. 99–114.
12. *Pandey J.K., Gopal R. Laser-induced chlorophyll fluorescence and reflectance spectroscopy of cadmium treated Triticum aestivum L. plants* // Spectroscopy. 2011. Vol. 26. No. 2. P. 129–139. DOI: 10.3233/SPE-2011-0530
URL: <https://www.hindawi.com/journals/jspec/2011/640232/abs>
13. *Gopal R., Pandey J.K. Laser-induced chlorophyll fluorescence spectra of Cajanus cajan L. plant growing under cadmium stress* // Proc. International Symposium on Molecular Spectroscopy. June 21–25, 2010, Ohio State University, Columbus, OH., USA.

14. *Pandey J.K., Gopal R.* Laser-induced chlorophyll fluorescence: a technique for detection of dimethoate effect on chlorophyll content and photosynthetic activity of wheat plant // *Journal of Fluorescence*. 2011. Vol. 21. No. 2. P. 785–791. DOI: 10.1007/s10895-010-0771-5
URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10895-010-0771-5>
15. *Лысенков В.С., Вардуні Т.В., Соіер В.Г., Краснов В.П.* Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода // *Фундаментальные исследования. Электрон. журн.* 2013. № 4-1. С. 112–119.
URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31109>
16. *Яковец О.Г.* Фитофизиология стресса. Минск: БГУ, 2010. 103 с.

Федотов Юрий Викторович — канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Булло Ольга Алексеевна — аспирантка кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Белов Михаил Леонидович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Городничев Виктор Александрович — д-р техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Экспериментальные исследования лазерного метода обнаружения стрессовых состояний растений // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2017. № 2. С. 21–32.
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-2-21-32

EXPERIMENTAL RESEARCH INTO LASER METHOD FOR DETECTING PLANT STRESS

Yu.V. Fedotov

fed@bmstu.ru

O.A. Bullo

ekomonit@bmstu.ru

M.L. Belov

belov@bmstu.ru

V.A. Gorodnichev

gorod@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of the work was to develop a laser fluorescence method for detecting plant stress. For the fluorescence excitation wave of 532 nm. length, we give the results of experimental studies of the spectra of laser-induced plant fluorescence in normal and various stress

Keywords

Laser method, laser-induced fluorescence, plant state control

conditions caused by the presence of various pollutants in the soil (salt, iron and copper sulfate), insufficient or excessive watering, mechanical damage to the leaves and the plant root system. We carried out a comparative analysis of options for selecting the spectral ranges of registering laser-induced fluorescence plant emission. Findings of the research show that for the plant state monitoring tasks, spectral bands with central wavelengths of 685 and 740 nm are the most efficient (in terms of reliability of correct detection of stress state) bands of fluorescence radiation detection

REFERENCES

- [1] Panneton B., Guillaume S., Roger J.M., Samson G. Discrimination of corn from monocotyledonous weeds with ultraviolet (UV) induced fluorescence. *Applied Spectroscopy*, 2011, vol. 65, no. 1, pp. 10–19. DOI: 10.1366/10-06100
Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1366/10-06100>
- [2] Gouveia-Neto A.S., Silva Jr. E.A., Oliveira R.A., Cunha P.C., Costa E.B., Câmara T.J.R., Willadino L.G. Water deficit and salt stress diagnosis through LED induced chlorophyll fluorescence analysis in *Jatropha curcas* L. oil plants for biodiesel. *Proc. of SPIE*. 2011, vol. 7902, pp. 79020A-1–79020A-10. DOI: 10.1117/12.872991
Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=718967>
- [3] Afonassenko A.V., Iglakova A.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Prokop'yev V.E. Laboratory and lidar measurements of birch leaves spectral characteristics in different periods of vegetation. *Optika atmosfery i okeana*, 2012, vol. 25, no. 3, pp. 237–243 (in Russ.).
- [4] Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Stability of results of plant state detection by laser fluorescence method. *Optika atmosfery i okeana*, 2016, vol. 29, no. 1, pp. 80–84 (in Russ.).
- [5] Panneton B., Guillaume S., Roger J.M., Samson G. Improved discrimination between monocotyledonous and dicotyledonous plants for weed control based on the blue-green region of ultraviolet-induced fluorescence spectra. *Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 64, no. 1, pp. 30–36. DOI: 10.1366/000370210790572106
Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1366/000370210790572106>
- [6] Zhi-qiang C., Wen-li C. Effects of NaCl on photosynthesis in *Arabidopsis* and *Thellungiella* leaves based on the fluorescence spectra, the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis and the delayed fluorescence technique. *Proc. of SPIE*. 2010, vol. 7568, pp. 756822-1–756822-8. DOI: 10.1117/12.841257
Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?Articleid=780701>
- [7] Gouveia-Neto A.S., Silva Jr. E.A., Costa Jr. E.B., Silva L.M.H., Câmara T.J.R., Willadino L.G. Plant abiotic stress diagnostic by laser induced chlorophyll fluorescence spectral analysis of in vivo leaf tissue of biofuel species. *Proc. of SPIE*. 2010, vol. 7568, pp. 75680G-1–75680G-8. DOI: 10.1117/12.839462
Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=780574>

- [8] Grishaev M.V., Sal'nikova N.S. A Setup for remote recording of the spectrum of laser-induced fluorescence from crowns of woody plants. *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 746–749. DOI: 10.1134/S0020441210050246
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0020441210050246>
- [9] Laser-induced fluorescence characteristics of vegetation by a new excitation wavelength / J. Yanga, W. Gongga, S. Shia, L. Dua, J. Suna, S. Songe. *Spectroscopy Letters*, 2016, vol. 49, no. 4, pp. 263–267. DOI: 10.1080/00387010.2016.1138311
Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00387010.2016.1138311>
- [10] Hedimbi M., Singh S., Kent A. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants. *Natural Science*, 2012, vol. 4, no. 6, pp. 395–401. DOI: 10.4236/ns.2012.46054
Available at: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=19977>
- [11] Saito K. Plant and vegetation monitoring using laser-induced fluorescence spectroscopy. In: *Industrial Applications of Laser Remote Sensing*. 2012, pp. 99–114.
- [12] Pandey J.K., Gopal R. Laser-induced chlorophyll fluorescence and reflectance spectroscopy of cadmium treated *Triticum aestivum* L. plants. *Spectroscopy*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 129–139. DOI: 10.3233/SPE-2011-0530
Available at: <https://www.hindawi.com/journals/jspec/2011/640232/abs>
- [13] Gopal R., Pandey J.K. Laser-induced chlorophyll fluorescence spectra of *Cajanus cajan* L. plant growing under cadmium stress. *Proc. Int. Symposium on Molecular Spectroscopy*. June 21–25, 2010, Ohio State University, Columbus, OH., USA.
- [14] Pandey J.K., Gopal R. Laser-induced chlorophyll fluorescence: a technique for detection of dimethoate effect on chlorophyll content and photosynthetic activity of wheat plant. *Journal of Fluorescence*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 785–791. DOI: 10.1007/s10895-010-0771-5
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10895-010-0771-5>
- [15] Lysenkov V.S., Varduni T.V., Soyer V.G., Krasnov V.P. Plant chlorophyll fluorescence as an environmental stress characteristic: a theoretical basis of the method application. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, no. 4-1, pp. 112–119 (in Russ.).
Available at: <http://fundamental-research.ru/en/article/view?id=31109>
- [16] Yakovets O.G. *Fitofiziologiya stressa* [Stress phytophysiology]. Minsk, BSU Publ., 2010. 103 p.

Fedotov Yu.V. — Cand. Sc. (Eng.), Research Scientist of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bullo O.A. — post-graduate of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

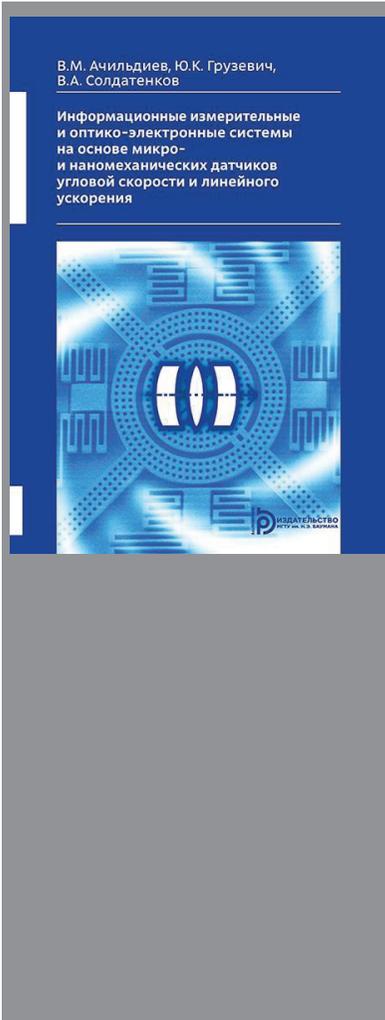
Belov M.L. — Dr. Sc. (Eng.), Chief Research Scientist of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Gorodnichev V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department Radioelectronics and Laser Technology Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Experimental Research into Laser Method for Detecting Plant Stress. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 2, pp. 21–32.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-2-21-32



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов

**В.М. Ачильдиева, Ю.К. Грузевича,
В.А. Солдатенкова**

**«Информационные измерительные
и оптико-электронные системы на основе микро-
и наномеханических датчиков угловой скорости
и линейного ускорения»**

Рассмотрены основные физические принципы работы и особенности функционирования гироскопов различных видов. Исследованы микромеханические гироскопы и акселерометры с рамочной и консольной конструкциями чувствительного элемента с емкостными и автоэлектронными преобразователями и наноэлектромеханические измерительные преобразователи для измерения тепловых полей малой интенсивности в инфракрасной и терагерцовой областях спектра. Предложены способы изготовления и локальной инициализации вискера по переменному току после формирования механической структуры чувствительного элемента. Описан синтез регуляторов методом модального управления и идентификации коэффициентов чувствительности к температуре и напряжению питания. Приведены примеры схем построения, моделирования и испытаний систем управления и навигации летательных микроаппаратов на основе бесплатформенных инерциальных блоков, различных информационно-измерительных средств с использованием наклономеров, оптико-электронных устройств наблюдения с определением координат удаленных объектов и наשלемных систем ориентации.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru