

УДК 504.064.36

Анализ возможностей лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений в стрессовых ситуациях, вызванных различными механическими повреждениями

Булло О. А.¹, Федотов Ю. В.¹,
Белов М. Л.^{1,*}, Городничев В. А.¹

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена разработке лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений. Приведены результаты экспериментальных исследований спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений при длине волны возбуждения флуоресценции 532 нм. Показано, что воздействие стрессового фактора, вызванного различными механическими повреждениями растений, может проявляться в изменении формы спектра флуоресценции. Идентифицирующим фактором, характеризующим изменение формы спектра лазерно-индуцированной флуоресценции, может быть отношение интенсивностей флуоресценции на двух длинах волн 680 и 740 нм. Измерение этого идентифицирующего фактора может быть положено в основу лазерного метода обнаружения стрессовых состояний растений.

Ключевые слова: лазерный метод, флуоресценция, растения, обнаружение стрессовых состояний

Введение

Флуоресцентный анализ широко используется в науке и технике в качестве высокочувствительного аналитического средства. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных направлений использования флуоресцентного анализа является контроль состояния растительности (см., например, [1-17]).

Основной составляющей флуоресцентного излучения живого листа в красном и дальнем красном диапазонах является флуоресценция хлорофилла *a*. При комнатной температуре этот спектр флуоресценции имеет два максимума – основной в области 680–690 нм (красный) и минорный – в области 730–740 нм (дальний красный). При этом флуоресценция в красном диапазоне и бóльшая часть флуоресценции дальнего красного

диапазона практически полностью определяется фотосистемой (ФС) II, см., например, [18].

Неблагоприятные внешние факторы приводят к стрессовым ситуациям для растений и невозможности их нормального роста. Для растения в стрессовом состоянии процесс фотосинтеза нарушается и картина флуоресценции изменяется (по сравнению с растением в нормальном состоянии). Причем спектр флуоресценции при этом зависит от многих факторов – вида стресса, вида растения, длины волны возбуждения и др. Окончательной ясной картины в настоящее время нет, поскольку стресс растений явление сложное (см., например, [19]).

Эффективным методом обнаружения стрессовых состояний растительности является метод лазерной индуцированной флуоресценции (см., например, [1-17]).

1. Постановка задачи

Число работ, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований спектров флуоресценции растительности в нормальном и стрессовом состояниях довольно велико. Однако, большинство работ в этой области посвящено контролю стрессовых состояний растений, вызванных недостаточным уровнем питательных веществ или наличием загрязнителей в почве. В настоящее время имеются лишь отдельные экспериментальные работы, посвященные исследованию спектров флуоресценции растений в стрессовых состояниях, вызванных различными механическими повреждениями растений.

На сегодняшний день накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции различных видов здоровой растительности и растительности в различных стрессовых при разных длинах волн возбуждения от 266 до 635 нм. Наибольшее количество экспериментальных работ, посвященных лазерно-индуцированной флуоресценции растений, приходится на длины волн возбуждения 337, 335 и 532 нм.

Статья посвящена экспериментальному исследованию изменений спектра лазерно-индуцированной флуоресценции при различных механических повреждениях растений для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм (для длины возбуждения 532 нм таких работ совсем мало [14,17]). Такая задача представляет практический интерес для оценки возможности контроля состояния растений (например, сельскохозяйственных культур) по результатам дистанционного измерения спектра флуоресценции растений.

2. Эксперимент

Для измерения спектров флуоресценции была создана лабораторная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

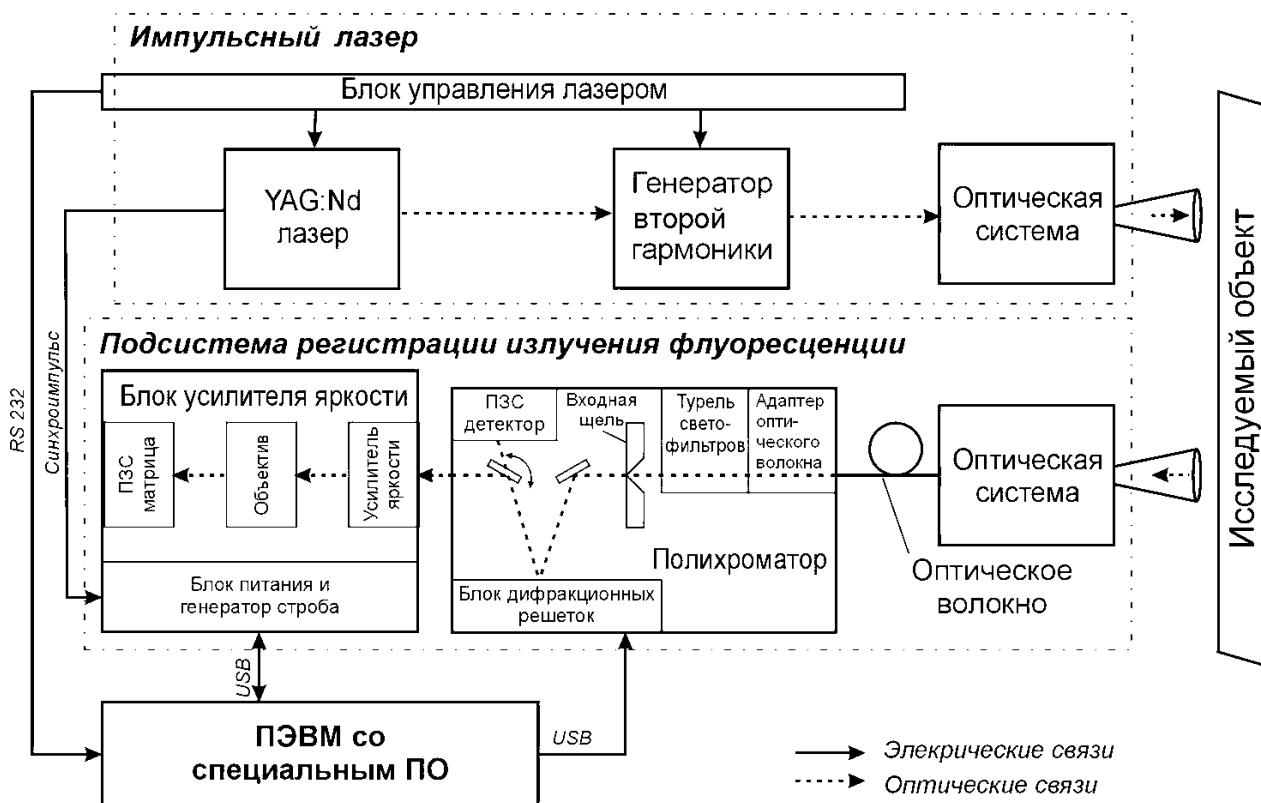


Рис. 1. Схема лабораторной установки

В качестве источника возбуждения излучения флуоресценции был использован твердотельный импульсный YAG:Nd лазер с диодной накачкой и с удвоением частоты.

Излучение флуоресценции собирается приемным объективом и вводится в оптическое волокно (диаметр сердечника которого 600 мкм) ахроматическим адаптером оптического волокна FA-1. Адаптер оснащен оптическим разъемом типа SMA-905 для присоединения волокна и позволяет проводить юстировку в трех плоскостях.

В качестве спектрального прибора используется полихроматор. Полихроматор полностью автоматизирован: смена решеток, оптических фильтров, выбор ширины входной щели осуществляется автоматически.

Спектр флуоресценции регистрируется высокочувствительным матричным детектором с усилителем яркости.

После усилителя яркости изображение переносится оптической системой на ПЗС детектора. Детектор преобразует изображение в цифровой массив и по интерфейсу USB 2.0 передает этот массив на компьютер.

Для управления установкой использовалось специальное программное обеспечение, реализованное в среде визуального программирования LabVIEW.

Основные параметры лабораторной установки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры лабораторной установки

Параметр	Значение параметра
Энергия импульса лазера, мДж	2,1
Длина волны возбуждения, нм	532
Длительность импульса лазера, нс	<7
Частота повторения, Гц	до 500
Диапазон регистрации спектра, нм	595 – 800
Разрешение по спектру, нм	6
Диаметр приемного объектива, мм	15

Объектом исследования в статье были изменения в спектрах лазерно-индуцированной флуоресценции растений, при воздействии на растения различных видов механических повреждений: обрезание листьев растения; повреждение корней; прижатие листьев.

Экспериментальные исследования проводились для быстрорастущих и неприхотливых видов растений (в статье приведены данные для салата, как примера сельскохозяйственных культур).

Экспериментальное исследование спектров флуоресценции включало в себя как предварительный этап калибровку оборудования. Калибровка измерительной аппаратуры состояла из следующих этапов:

1). Калибровка полихроматора по длине волны с использованием стандартной методики и калибровочного источника света на основе ртутно-аргоновой лампы с линейчатым спектром. Проверка проводилась по трем длинам волн (253,65 нм; 435,85 нм; 696,54 нм). В случае наличия недопустимого уровня погрешностей по длине волны, большего 0,5 нм, осуществлялась перекалибровка подсистемы регистрации по длине волны.

2). Измерение фоновых шумов детектора на основе усилителя яркости при тех же параметрах, при которых впоследствии проводилась регистрация спектров флуоресценции. Регистрация фоновых шумов осуществлялась при закрытом затворе полихроматора, результирующее распределение фоновых шумов по каналам детектора определялось в результате усреднения по 100 измерениям. Полученное распределение фоновых шумов записывалось в файл и в дальнейшем вычиталось из измеряемых спектров, что позволило частично устранить их влияние и тем самым повысить отношение сигнал-шум.

3). Калибровка системы регистрации по чувствительности в диапазоне от 250 до 750 нм осуществлялась по стандартной методике с помощью калиброванного источника света DH2000-CAL.

Для измерения спектров флуоресценции использовалась ширина щели полихроматора равная 200 мкм, что обеспечивало спектральное разрешение 5 нм.

3. Анализ полученных экспериментальных данных

Первая фаза стресса растений – первичная индуктивная стрессовая реакция [18,19]. Для этой стадии характерно уменьшение интенсивности фотосинтеза, что сопровождается существенным увеличением интенсивности флуоресценции хлорофилла.

Возрастание квантового выхода флуоресценции в этом случае обусловлено уменьшением эффективности первичных процессов фотосинтеза - поглощенная световая энергия не используется в фотосинтезе, поэтому интенсивность флуоресценции возрастает (т.е. интенсивность флуоресценции может быть показателем стрессового состояния растения).

Увеличение интенсивности флуоресценции характерно для данных измерений спектров при механическом повреждении растений (см., например, [14,17]).

В тоже время по имеющимся данным для растений в стрессовом состоянии колебания активности ФС II могут приводить к изменениям отношения интенсивностей флуоресценции в красной и дальней красной области (т.е. к изменению формы спектра флуоресценции) [18].

Этот эффект хорошо виден из результатов работ [9,11]. В работах [9,11] приведены экспериментальные данные для длины волн возбуждения 532 нм при стрессах, связанных с недостатком азотных удобрений и внесением в почву различных загрязнителей.

Эффект изменения отношения интенсивностей флуоресценции в красной и дальней красной области для механических повреждений растений и длины волн возбуждения 532 нм хорошо иллюстрирует рисунок 2.

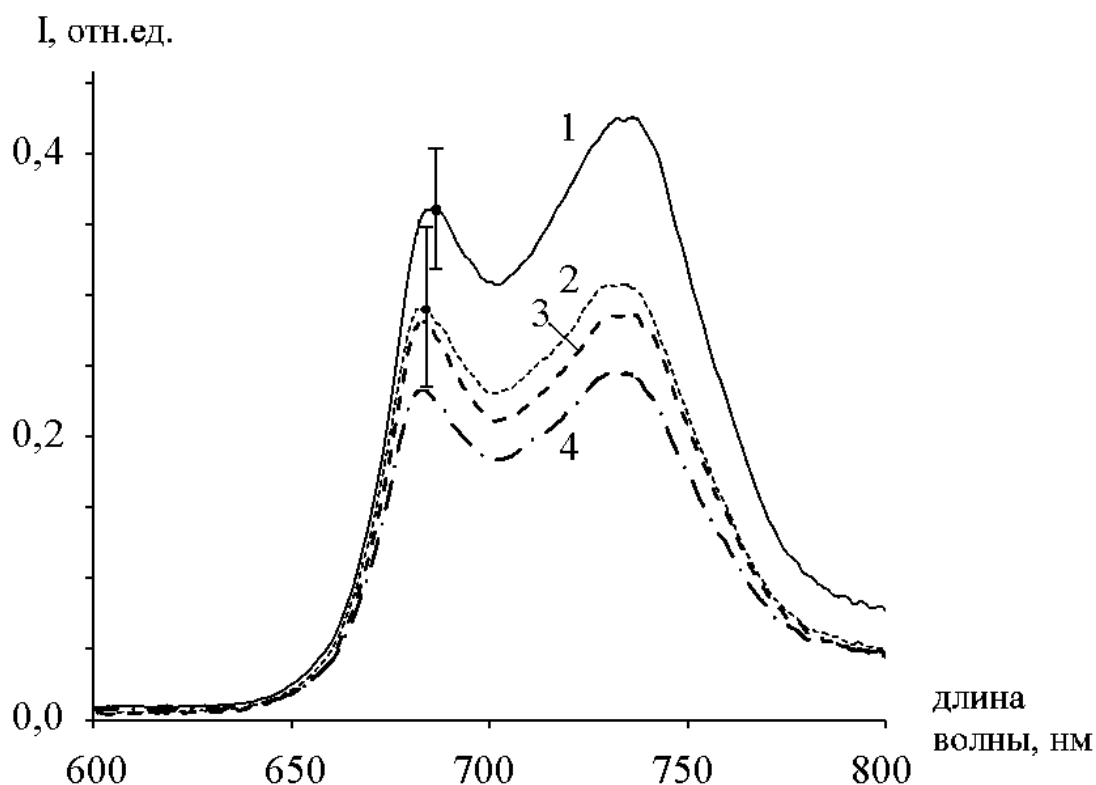


Рис. 2. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции для кресс-салата при различных механических повреждениях.

На рисунке 2 приведены спектры лазерно-индуцированной флуоресценции кресс-салата в нормальном состоянии (кривая 1) и стрессовом состоянии, вызванном примятием листьев салата (кривая 2), обрезанием листьев салата (кривая 3) и механическим повреждением корней растения (кривая 4). Кривая 1 соответствует усредненному (по разным измерениям) спектру контрольных экземпляров растений (в нормальном состоянии). Кривые 2,3,4 - усредненным (по разным измерениям) спектрам экземпляров растений в стрессовых состояниях (в интервале времени от 20 мин до 40 минут после механического повреждения). Вертикальные линии показывают доверительные интервалы (при доверительной вероятности 99%) для контрольного спектра 1 и спектра 2 для стрессового состояния, вызванного примятием листьев салата (доверительные интервалы для спектров 3 и 4 имеют тот же порядок, что и спектра 2).

Из рисунка 2 видно, что интенсивность флуоресценции для растений в стрессовом состоянии для данной конкретной серии экспериментов в среднем даже несколько меньше интенсивности флуоресценции для растений в нормальном состоянии (а для отдельных измеренных спектров интенсивность флуоресценции в стрессовом состоянии может быть как больше, так и меньше интенсивности флуоресценции для нормального состояния).

Усреднение данных для рисунка 2 проводилось по времени измерения и по разным образцам растений – по 18 измерениям для контрольных экземпляров растений и по 12 – для растений в стрессовом состоянии. При этом положение лазерного пятна (на растении) для разного времени измерения и для разных образцов растений было случайным. Это приводило к разбросу значений интенсивности флуоресценции для разных измерений: мы связываем разброс интенсивности флуоресценции с тем, что некоторая (случайная) часть лазерного пятна попадала на почву, флуоресценция от которой была на порядок меньшей, чем от растений.

Однако, несмотря на значительный разброс значений интенсивности форма спектров флуоресценции (в пределах каждой из групп - растений в нормальном или стрессовом состоянии) изменяется несущественно. Во всех экспериментах при стрессовом состоянии растений существенно увеличивается отношение интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 и 740 нм.

На рисунке 3 приведено усредненное (по разным измерениям) отношение $\frac{I_{680}}{I_{740}}$ интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 и 740 нм. Обозначения те же, что и на рисунке 3 (только теперь они относятся не к спектрам флуоресценции, а к столбцам, характеризующим отношение $\frac{I_{680}}{I_{740}}$). Вертикальные линии также показывают доверительные интервалы (при доверительной вероятности 99%) для отношения $\frac{I_{680}}{I_{740}}$.

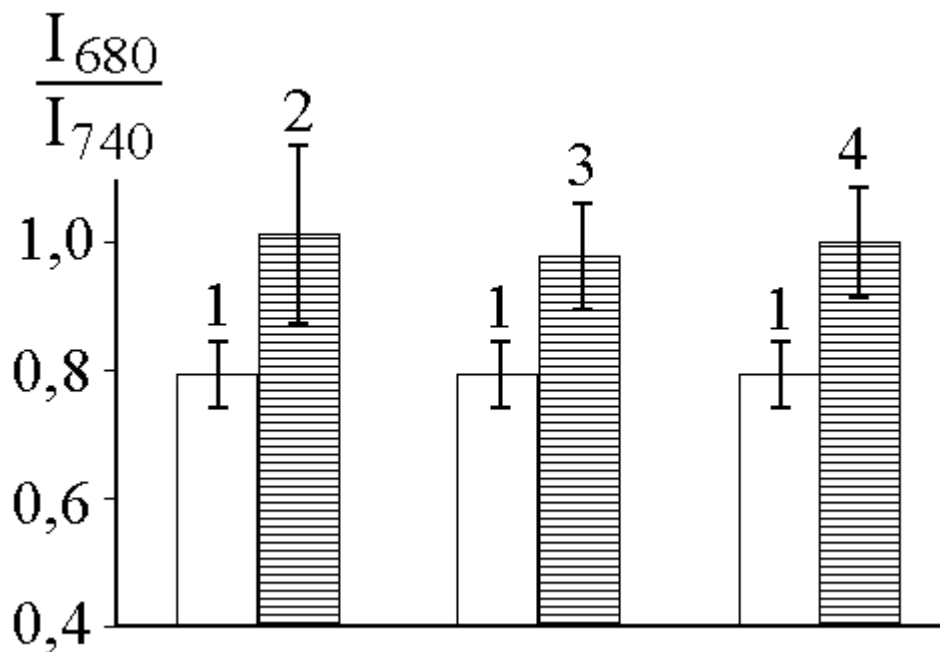


Рис. 3. Величина отношения $\frac{I_{680}}{I_{740}}$ для кресс-салата при различных механических повреждениях.

Из рисунка 3 видно, что величина $\frac{I_{680}}{I_{740}}$, характеризующая форму спектра флуоресценции, существенно отличается для контрольных образцов растений и растений в стрессовых состояниях.

Это говорит о потенциальной возможности использования отношения интенсивностей флуоресценции в красной и дальней красной области как показателя, отражающего стрессовые состояния, вызванные механическими повреждениями растений.

Заключение

Таким образом, экспериментальные исследования показывают, что при длине волны возбуждения флуоресценции 532 нм воздействие стрессового фактора, вызванного различными механическими повреждениями растений, может проявляться в изменении формы спектра флуоресценции. Это потенциально позволяет обнаруживать стрессовые состояния растений, вызванные механическим повреждением, лазерным флуоресцентным методом.

Список литературы

1. Gouveia-Neto A.S., Silva E.A., Oliveira R.A., Cunha P.C., Costa E.B., Camara 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. P. 79020A-1 - 79020A-10.
2. Burling K., Hunsche M., Noga G. Use of blue-green and chlorophyll fluorescence measurements for differentiation between nitrogen deficiency and pathogen infection in winter wheat // Journal of Plant Physiology. 2011. Vol. 168. P. 1641–1648.
3. Афонасенко А.В., Иглакова А.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Прокопьев В.Е. Лабораторные и лидарные измерения спектральных характеристик листьев березы в различные периоды вегетации // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 237-243.
4. [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.
5. [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.
6. 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.
7. Gouveia-Neto A.S., da Silva E.A., Cunha P.C., Oliveira-Filho R.A., Silva L.M. H., da Costa E.B., 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. P. 75680G-1 - 75680G-8.
8. 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.
9. Middleton E., McMurtrey J.E., P.K.E. Campbell P.K.E., Corp L.A., Butcher L.A., Chappelle E.W. Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 4879. P. 72 - 83.
10. Fateeva N.L., Matvienko G. G. Application of the method of laser-induced fluorescence // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5232. P. 652 - 657.
11. Matvienko G., Timofeev V., Grishin A., Fateyeva N. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6367. P. 63670F-1 - 63670F-8.

12. Н.Л. Фатеева, А.В. Климкин, О.В. Бендер, А.П. Зотикова, М.С. Ямбуров, Исследование лазерно-индуцированной флуоресценции хвойных и лиственных растений при азотном загрязнении почвы // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 2-3. С. 212 – 215.
13. Maurya R., Prasad S.M., Gopal R. LIF technique offers the potential for the detection of cadmium-induced alteration in photosynthetic activities of *Zea Mays* L. // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 2008. Vol. 9. P. 29–35.
14. Belasque J., Gasparoto M.C.G., Marcassa L.G. Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy // Applied Optics. 2008. Vol. 47, no. 11, P. 1922-1926..
15. Креков Г.М., Крекова М.М, Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г. Статистическое моделирование лазерно-индуцированной флуоресценции в растительных покровах // Журнал прикладной спектроскопии. 2009. Т. 76, № 3. С. 411-418.
16. Corp L.A., McMurtrey J.E., Middleton E.M., Mulchi C.L., Chappelle E.W., Daughtry C.S.T. Fluorescence sensing systems: In vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 86. P. 470-479.
17. Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Матросова О.А., Городничев В.А. Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений в стрессовых состояниях, вызванных механическими повреждениями // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. С. 321-334. DOI: [10.7463/1112.0480063](https://doi.org/10.7463/1112.0480063)
18. Лысенков В.С., Вардуни Т.В., Сойер В.Г., Краснов В.П. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода // Фундаментальные исследования. 2013. № 4. С. 112-119.
19. Яковец О.Г. Фитофизиология стресса. Минск: БГУ, 2010. 103 с.

Analysis of Laser Fluorescence Method for Remote Sensing of Plants in Stress Situations Because of Various Mechanical Damages

O.A. Bullo¹, Yu.V. Fedotov¹, M.L. Belov^{1,*},
V.A. Gorodnichev¹

*belov@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser method, fluorescence, vegetation, detection of plant stress

Today one of the most promising lines to use a fluorescence analysis is to monitor the vegetation state.

There are a large number of papers, which present the results of experimental studies of vegetation fluorescence spectra in normal and stressful situations. However, most works in the field concerned describe sensing the plants under stress caused by insufficient nutrients or pollutants in the soil. Currently, there are only a few experimental works, which study the fluorescence spectra of plants under stress caused by different mechanical damage of plants.

The paper presents results of experimentally studied laser-induced fluorescence spectra of plants with different mechanical damage for the fluorescence excitation wavelength of 532 nm.

To measure the fluorescence spectra was created laboratory setup. A solid state pulse YAG: frequency-doubled ND and diode-pumped solid-state laser has been used as a source of the fluorescence excitation. The highly sensitive array detector with an intensifier provided a record of the fluorescence spectrum.

The paper studied the change in the laser-induced fluorescence spectra of plants when exposed to a diversity of mechanical damage such as cutting leaves of the plant; damage of the roots; trampled leaves.

The paper conducts the experimental study of the fast growing and easy to keep plants (it shows data for the salad, as an example of crop plants).

Experimental studies have shown that at the fluorescence excitation wavelength of 532 nm the effect of stress factor because of different mechanical damage may be evident as a changing form of the fluorescence spectrum. All experiments with plant stress have shown that at 680 and 740 nm wavelengths the ratio of fluorescence intensities significantly increases. This potentially allows us to use the laser fluorescence method to detect the stress situations of plants caused by mechanical damage.

References

1. Gouveia-Neto A.S., Silva E.A., Oliveira R.A., Cunha P.C., Costa E.B., Camara 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.
2. Burling K., Hunsche M., Noga G. Use of blue–green and chlorophyll fluorescence measurements for differentiation between nitrogen deficiency and pathogen infection in winter wheat. *Journal of Plant Physiology*, 2011, vol. 168, pp. 1641– 1648.
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 = Atmospheric and oceanic optics journal*, 2012, vol. 25, no. 3, pp. 237-243. (in Russian)
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Gouveia-Neto A.S., da Silva E.A., Cunha P.C., Oliveira-Filho R.A., Silva L.M. H., da Costa E.B., 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.
8. 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.
9. Middleton E., McMurtrey J.E., P.K.E. Campbell P.K.E., Corp L.A., L.A. Butcher L.A., Chappelle E.W. Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes. *Proc. of SPIE*, 2003, vol. 4879, pp. 72 - 83.
10. Fateeva N.L., Matvienko G. G. Application of the method of laser-induced fluorescence. *Proc. of SPIE*, 2004, vol. 5232, pp. 652 - 657.
11. Matvienko G., Timofeev V., Grishin A., Fateyeva N. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6367, pp. 63670F-1 - 63670F-8.

12. Fateeva N.L., Klimkin A.V., Bender O.V., Zotikova A.P., Yamburov M.S., Analysis of laser-induced fluorescence in wood plants under nitrogen soil pollution. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and oceanic optics journal*, 2006, vol. 19, no. 2-3, pp. 212 – 215. (in Russian)
13. Maurya R., Prasad S.M., Gopal R. LIF technique offers the potential for the detection of cadmium-induced alteration in photosynthetic activities of Zea Mays L. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2008, vol. 9, pp. 29–35.
14. Belasque J., Gasparoto M.C.G., Marcassa L.G. Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 11, pp. 1922-1926.
15. Krekov G.M., Krekova M.M, Lisenko A.A., Matvienko G.G. Statistical modelling of laser induced fluorescence in plant cover. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*, 2009, vol. 76, no. 3, pp. 411-418. (in Russian). (English version of journal: *Journal of Applied Spectroscopy*, 2009, vol. 76, no. 3, pp. 386-393. DOI: [10.1007/s10812-009-9184-0](https://doi.org/10.1007/s10812-009-9184-0))
16. Corp L.A., McMurtrey J.E., Middleton E.M., Mulchi C.L., Chappelle E.W., Daughtry C.S.T. Fluorescence sensing systems: In vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 86, pp. 470-479.
17. Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Matrosova O.A., Gorodnichev V.A. Experimental studies of laser fluorescence method for remote sensing of plants in stressful situations due to mechanical injuries. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 11, pp. 321-334. DOI: [10.7463/1112.0480063](https://doi.org/10.7463/1112.0480063)
18. Lysenkov V.S., Varduni T.V., Soyev 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, pp. 112-119. (in Russian)
19. Yakovets O.G. *Fitofiziologiya stressa* [Stress phytophysiology]. Minsk, BSU Publ., 2010, 103 p. (in Russian).