

УДК 504.064.36

## **Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений для стрессовых состояний, вызванных механическим повреждением корневой системы**

Федотов Ю.В.<sup>1</sup>, Булло О.А.<sup>1</sup>, Белов М.Л.<sup>1,\*</sup>,  
Болвачев В.В.<sup>1</sup>, Городничев В.А.<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Статья посвящена разработке лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений. Приведены результаты экспериментальных исследований спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в стрессовых состояниях, вызванных механическим повреждением корневой системы. Показано, что при длине волны возбуждения флуоресценции 532 нм воздействие стрессового фактора проявляется 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 формы спектра лазерно-индуцированной флуоресценции растений может быть положено в основу лазерного метода обнаружения стрессовых состояний растений.

**Ключевые слова:** лазерно-индуцированная флуоресценция, спектры, растения, стрессовые состояния

---

### **Введение**

Неблагоприятные внешние факторы приводят к стрессовым состояниям растений и невозможности их нормального роста. Стрессовые состояния сложно идентифицировать на ранних стадиях по внешнему виду растений. Поэтому важным является разработка методов и приборов обнаружения стрессовых состояний растений.

Эффективным методом обнаружения стрессовых состояний растительности является метод лазерной индуцированной флуоресценции (см., например, [1-16]).

Стрессовые состояния сложно идентифицировать на ранних стадиях по внешнему виду растений. Однако, флуоресцентный анализ потенциально позволяет обнаруживать стрессовые состояния растений по искажению спектров лазерно-индуцированной флуоресценции.

На сегодняшний день в научно-технической литературе представлены 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 число экспериментов посвящено исследованию флуоресценции растений при использовании (для возбуждения флуоресценции) лазеров на длинах волн 337 (азотный лазер), 355 и 532 нм (третья и вторая гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима (YAG:Nd)). Наиболее перспективным для создания бортовой аппаратуры лазерным источником в этой спектральной области является твердотельный импульсный лазер на длине волны 532 нм (вторая гармоника лазера на YAG:Nd). Он имеет преимущество (при разработке аппаратуры для дистанционного зондирования) как перед азотным лазером на 337 нм (в бортовой аппаратуре лучше использовать твердотельные лазеры), так и перед лазером на 355 нм (третья гармоника лазера на YAG:Nd имеет меньшую энергию в импульсе, чем вторая). Кроме того, эффективность возбуждения флуоресценции на длине волны 532 нм существенно больше, чем на длинах волн 337 и 355 нм.

Статья посвящена разработке лазерного метода контроля стрессовых состояний растений для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм. Такая задача представляет практический интерес для мониторинга состояния растений по результатам неконтактных или дистанционных измерений.

## 1. Постановка задачи

Стрессовые состояния растений могут быть вызваны многими причинами - недостаточной или избыточной влажностью; механическими повреждениями; болезнями; низкими или высокими температурами; недостатком питательных веществ; недостатком освещенности; засолением почвы; загрязнением почвы нефтепродуктами или тяжелыми металлами; повышенной кислотностью почвы; использованием пестицидов, гербицидов, инсектицидов и т.п.

Большинство имеющихся в настоящее время экспериментальных работ по исследованию спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений посвящено контролю стрессовых состояний растений, вызванных недостаточным уровнем питательных веществ или наличием загрязнителей в почве. В настоящее время имеются отдельные экспериментальные работы, посвященные исследованию спектров флуоресценции растений в стрессовых состояниях, вызванных различными механическими повреждениями растений (см., например, [12; 17-20]).

Статья приводятся результаты экспериментальных исследований лазерного флуоресцентного метода обнаружения стрессовых состояний растений при механических повреждениях корневой системы растений для длины возбуждения флуоресценции 532 нм.

## 2. Эксперимент

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

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

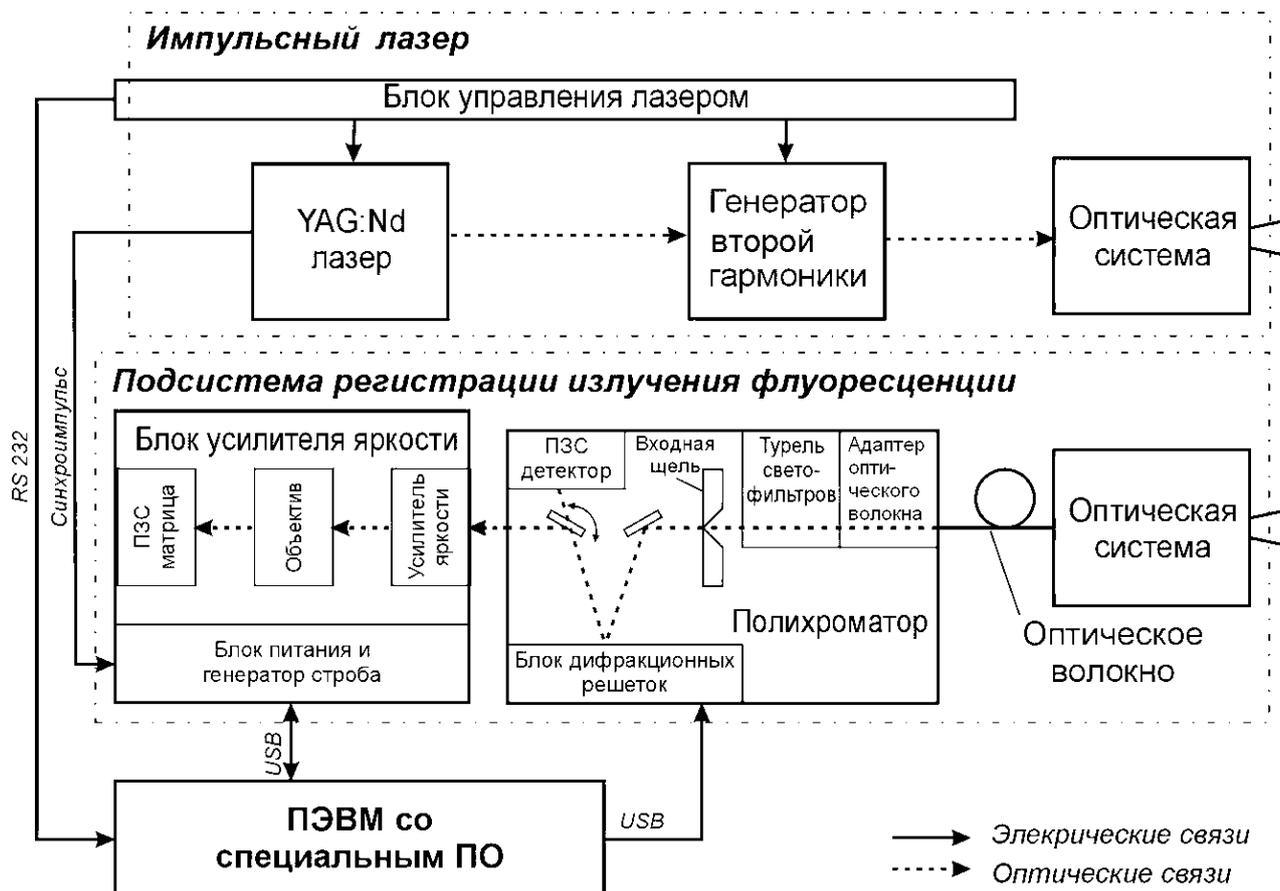


Рис. 1. Схема лабораторной установки для измерения спектров флуоресценции растений.

Излучение флуоресценции собирается приемным объективом и вводится в оптическое волокно. 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 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

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).

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

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

Объектом исследования были изменения в спектрах лазерно-индуцированной флуоресценции растений при механических повреждениях корневой системы растений.

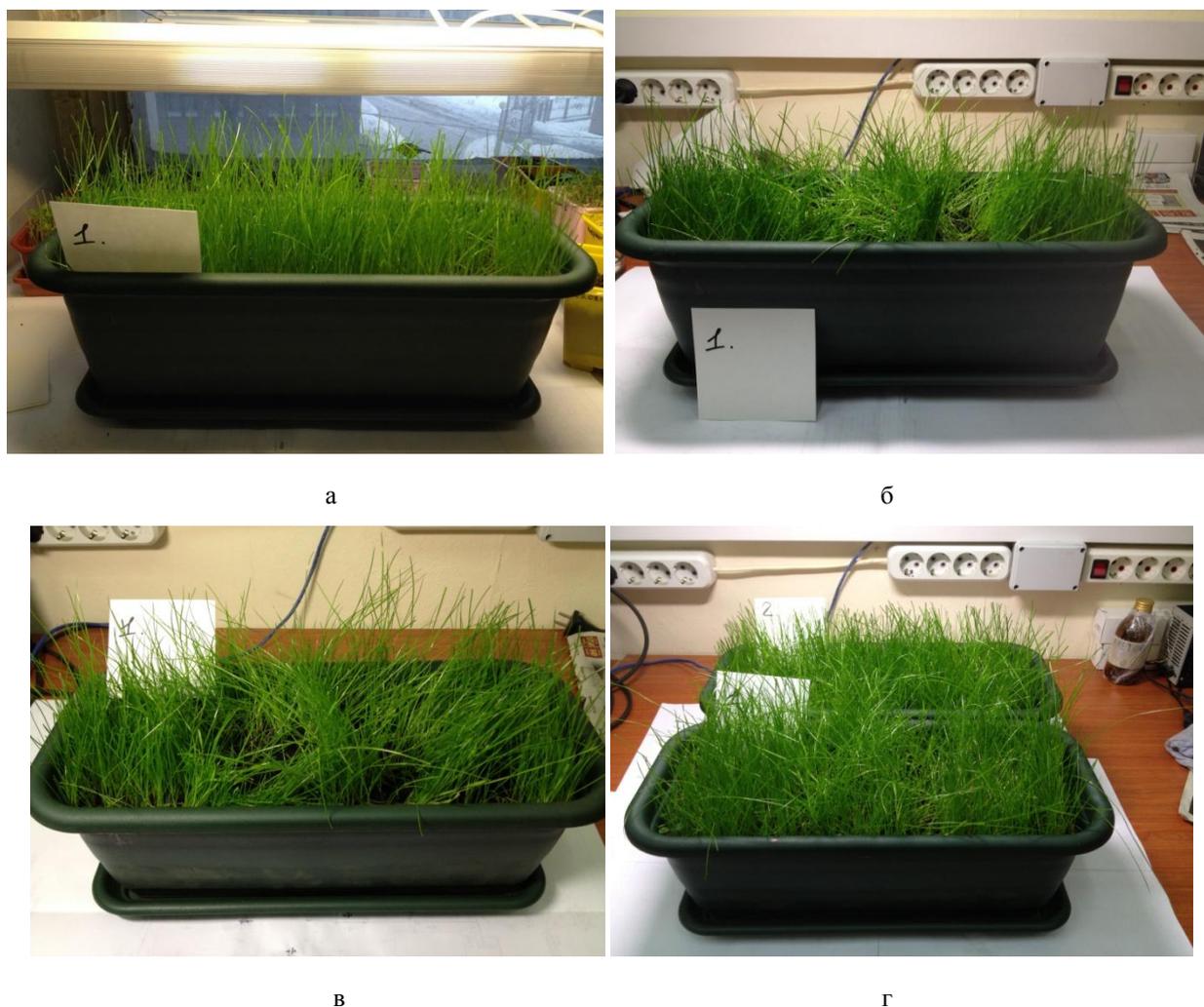
В работе производилось исследование спектров флуоресценции газонной травы, находящейся в нормальном состоянии и при воздействии механических повреждений (обрезании) корневой системы травы.

Газонная трава была выращена из газонной смеси Декора Aros. Состав газонной смеси Декора AROS: райграс пастбищный ЭСКВАЭР - 30%; овсяница красная ФЕРОТА - 15%; овсяница красная МАКСИМА 1 - 30%; овсяница красная МИСТИК - 20%; овсяница овечья НОРДИК - 5%. В качестве грунта использовался стандартный грунт для посадок. Трава была высажена в емкостях длиной 40 см. Измерения спектров флуоресценции травы в нормальном и стрессовом состояниях проводились через месяц после посадки травы. Размер лазерного пятна на траве примерно 2,5 см.

На рис. 2 представлена фотография образца №1 травы, с которыми проводились эксперименты по влиянию механического повреждения корневой системы. Здесь а – образец в нормальном состоянии, б - образец в стрессовом состоянии, вызванном механическим повреждением (подрезанием) корневой системы в средней части емкости, в ко-

торой была высажена трава (в день, когда происходило подрезание корневой системы), в, г - образцы в стрессовом состоянии, через 2 дня и 10 дней после механического повреждения (подрезания) корневой системы.

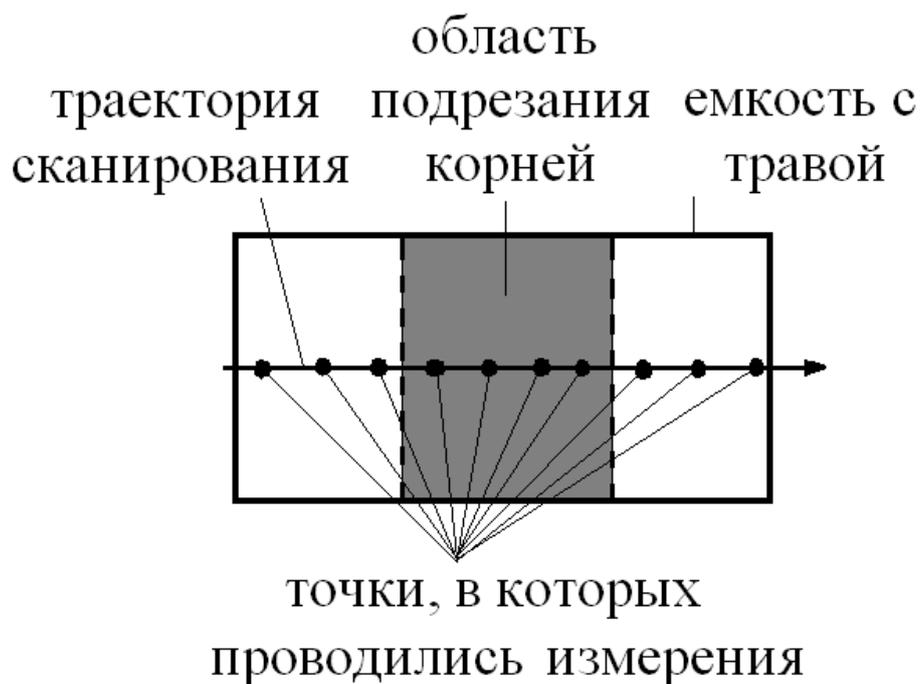
Приведенные фотографии показывают, что по внешнему виду травы трудно судить находится она в нормальном или стрессовом состоянии.



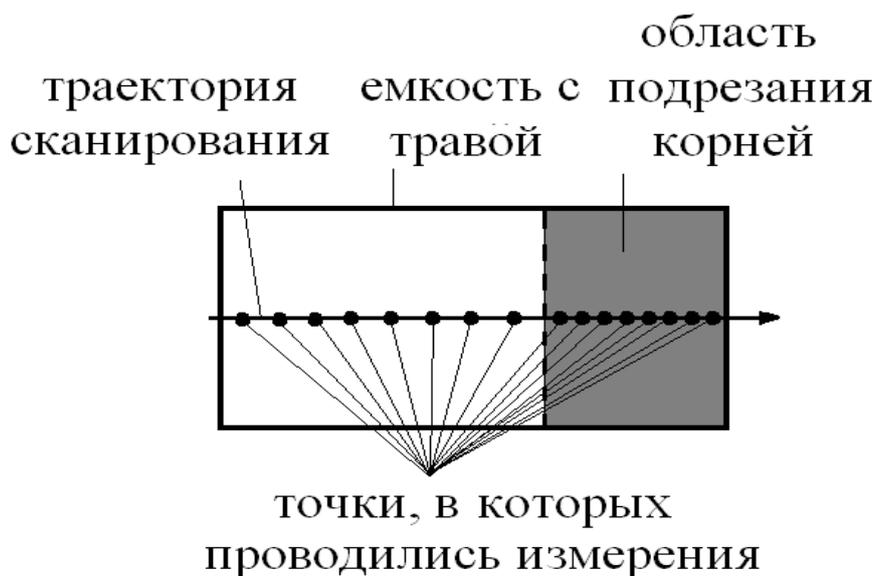
**Рис. 2.** Внешний вид образцов травы в нормальном и стрессовом состояниях

При измерениях спектров флуоресценции проводилось пространственное сканирование вдоль длинной стороны емкостей с травой (по середине короткой стороны).

Схемы расположения точек измерения в емкостях, в которой была высажена трава, и положение областей, в которой проводилось подрезание корневой системы, показаны на рисунках 3 а и 3 б.



а



б

**Рис.3** Траектория сканирования и точки измерения спектров флуоресценции

### 3. Анализ полученных экспериментальных данных

На рис. 4 и 5 приведены характерные примеры измеренных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции травы в нормальном состоянии (до подрезания корней - рисунок 4) и в стрессовом (в интервале времени от 25 до 45 минут после подрезания корней - рисунок 5) состоянии. Разные кривые на рисунках соответствуют разным точкам измерения.

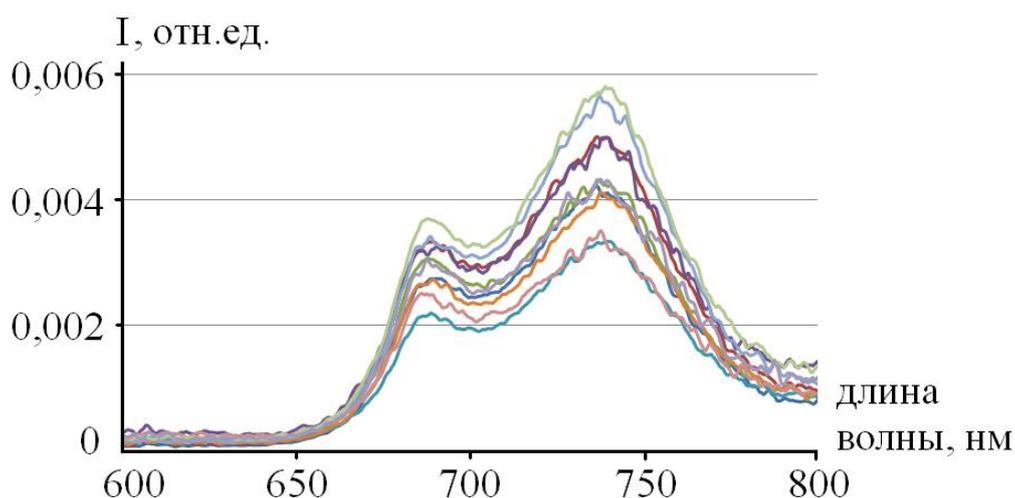


Рис. 4. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции травы в нормальном состоянии

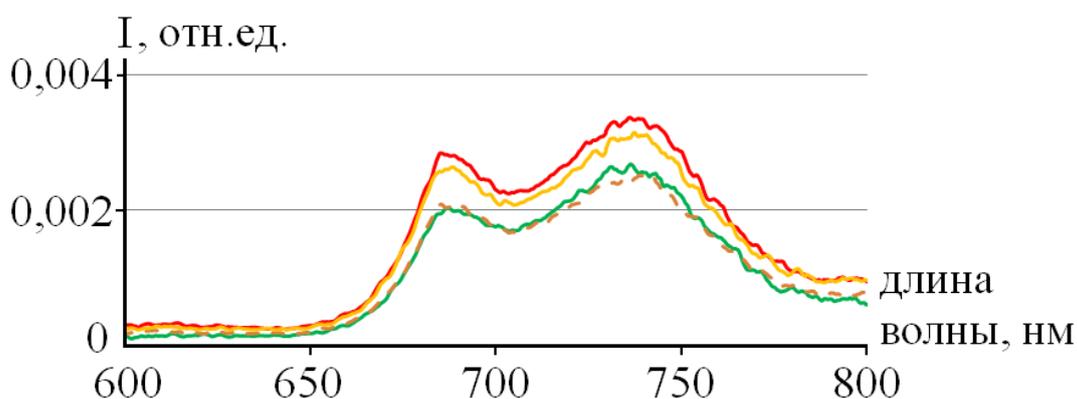


Рис. 5. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции травы в стрессовом состоянии

На рисунках 4 и 5 видно изменения формы спектра флуоресценции для растений в стрессовом состоянии (отношение  $R$  интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680...690 и 735...745 нм различно для рисунков 4 и 5).

На рисунке 6 (для тех же измерений, для которых получен рисунок 5) приведена зависимость отношения  $R$  от номера точки измерения  $i$ . Здесь (и на последующих рисунках в статье) отношение  $R$  определялось как отношение интенсивностей флуоресценции на длинах волн 685 и 740 нм для ширины спектральных каналов измерения 10 нм.

На рисунке 7 (для тех же измерений, для которых получены рисунки 5 и 6) показаны средние значения для отношения  $R$  по областям подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось.

На рисунке 8 показаны средние значения и доверительные интервалы (для доверительной вероятности 75 %) для отношения  $R$  по областям подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось, для всех измерений в течение дня (в ин-

тервале времени от 25 минут до 4,5 часов после подрезания корней). Средние значения и доверительные интервалы  $R$  по области подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось, соответственно равны  $(0,785; \pm 0,05)$  и  $(0,675; \pm 0,05)$ ,  $(0,72; \pm 0,09)$ .

На рисунках 6-8 значение номера точки измерения  $i$  с 4 по 7 соответствует области подрезания корней, а с 1 по 3 и с 8 по 10 соответствует областям, для которых подрезание корней не проводилось.

Из рисунков 6-8 видно, что в день, когда подрезались корни травы, отношение  $R$  интенсивностей флуоресценции на длинах волн 685 и 740 нм для травы в области подрезания корней в большинстве случаев больше, чем величина  $R$  для травы в областях, для которых подрезание корней не проводилось. Отметим, что относительно большое значение отношения  $R$  для номеров точки измерения  $i$  с 8 по 10 для рисунка 6 и относительно большое среднее значение отношения  $R$  (и большой доверительный интервал – т.е. большой разброс данных измерений) для этих же точек измерения на рисунке 8 может быть связан с большой высотой травы (корни травы находятся в области подрезания корней, а верхушки – в области  $i$  с 8 по 10, для которой подрезание корней не проводилось).

Измерения проводились также через 2, 7 и 9 дней после подрезания корней. В большинстве случаев эксперименты показывают уменьшение эффекта и сильные вариации результатов измерений для разных экспериментов, проводимых в разное время и разные дни.

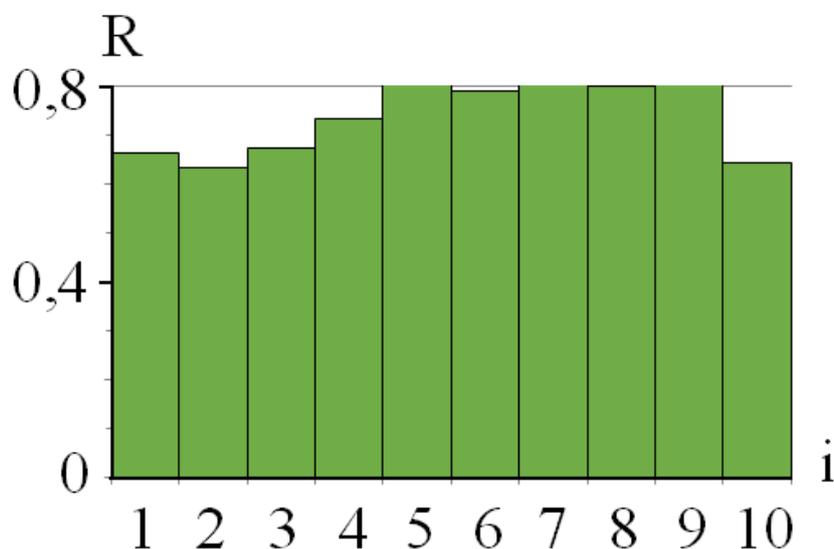
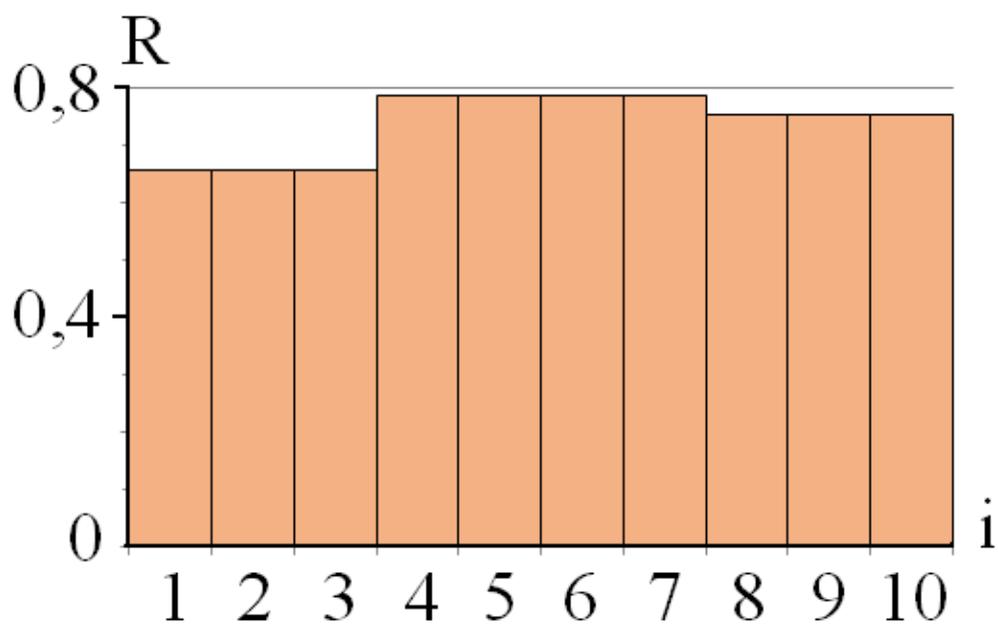
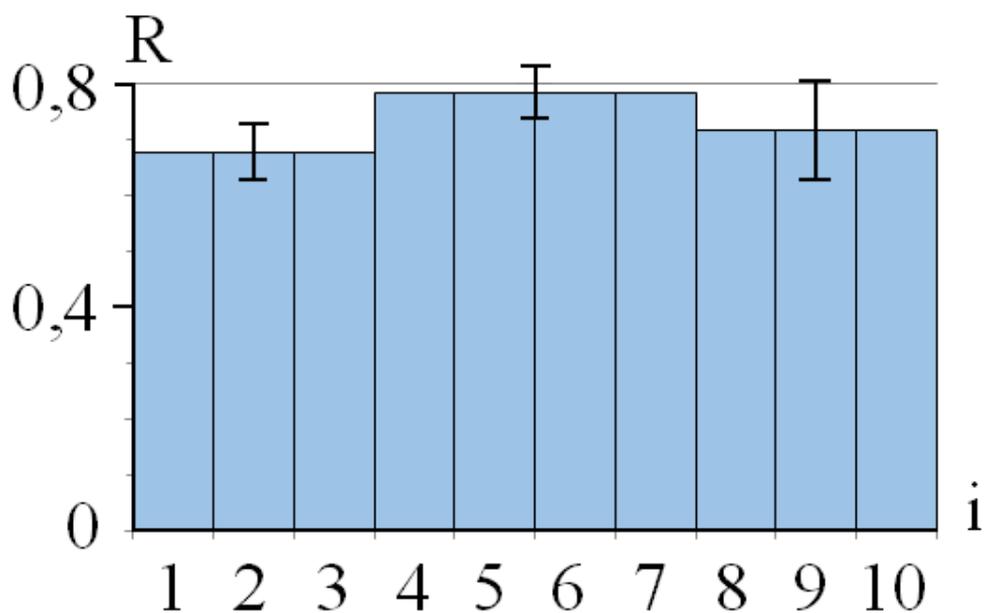


Рис. 6. Зависимость отношения  $R$  от номера точки измерения  $i$  для схемы измерения 3 а.



**Рис. 7.** Средние значения отношения  $R$  по областям подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось, для схемы измерения 3 а.



**Рис. 8.** Средние значения и доверительные интервалы для отношения  $R$  по областям подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось, для всех измерений в течение дня и схемы измерения 3 а.

Рисунок 9 показывают аналогичную (рисунку 6) зависимость (в интервале времени от 3 до 30 минут после подрезания корней) отношения  $R$  от номера точки измерения  $i$  для схемы измерения, приведенной на рисунке 3б. Для этой же схемы измерения на рисунке 10 показаны средние значения и доверительные интервалы (для доверительной вероятности 75 %) для отношения  $R$  по области подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось, для всех измерений в течение дня (в интервале времени от 3 минут до 1 часа после подрезания корней).

На рисунках 9 и 10 значение номера точки измерения  $i$  с 9 по 16 соответствует области подрезания корней, а с 1 по 8 соответствует области, для которой подрезание корней не проводилось. Для рисунка 10 средние значения и доверительные интервалы  $R$  по области подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось, соответственно равны  $(0,79; \pm 0,04)$  и  $(0,69; \pm 0,04)$ .

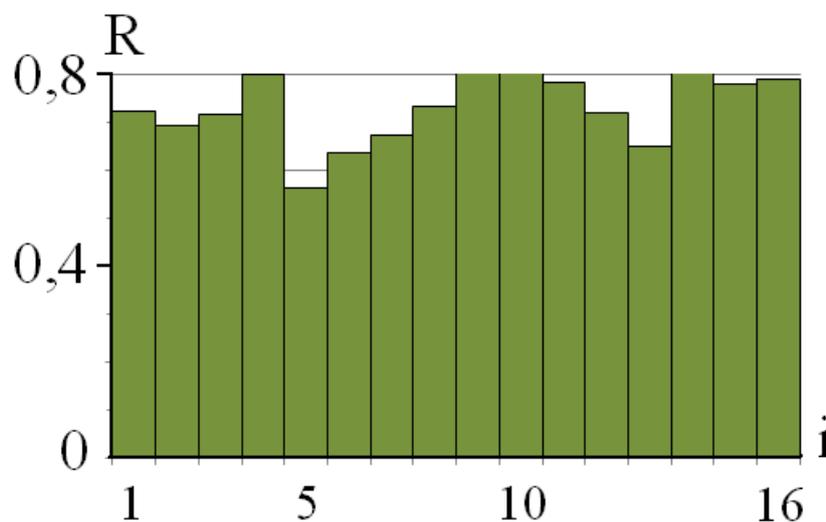


Рис.9. Зависимость отношения  $R$  от номера точки измерения  $i$  для схемы измерения 3 б.

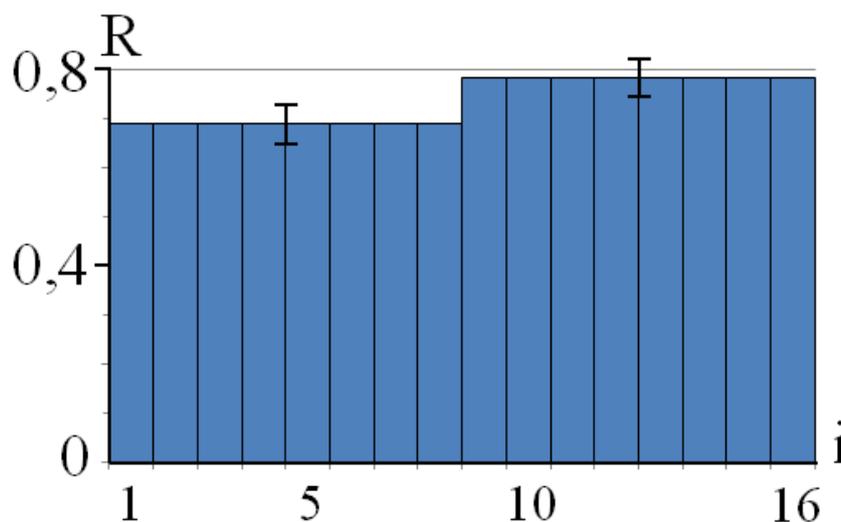


Рис.10. Средние значения и доверительные интервалы для отношения  $R$  по областям подрезания корней и областям, для которых подрезание корней не проводилось, для всех измерений в течение дня и схемы измерения 3 б.

Рисунки 9 и 10 (как и рисунки 6-8 показывают), что в день, когда подрезались корни травы, отношение  $R$  интенсивностей флуоресценции на длинах волн 685 и 740 нм для травы в области подрезания корней больше, чем величина  $R$  для травы в областях, для которых подрезание корней не проводилось. При этом доверительные интервалы (для доверительной вероятности 75 %) для отношения  $R$  малы (их сумма меньше разницы средних значений величины  $R$  для нормального состояния и стрессовых состояний).

Таким образом, при длине волны возбуждения 532 нм результаты экспериментальных исследований спектров флуоресценции травы в нормальном и стрессовом состояниях, вызванных механическими повреждениями корневой системы показывают:

- при одиночных измерениях можно ошибиться, определяя состояние растения (нормальное или стрессовое) по величине отношения  $R$ . Более надежным является определение состояния растений по средней величине отношения  $R$  даже для небольшой серии измерений.

- отличие средних значений величины  $R$  для нормального состояния и стрессовых состояний в большинстве случаев больше, чем различие величины  $R$  для разных точек измерения для нормального или стрессового состояния травы.

## Заключение

Экспериментальные исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции травы для длины волны возбуждения 532 нм показывают, что воздействие на растение стрессовых факторов, вызванных механическими повреждениями корневой системы, существенно искажает спектр флуоресценции. Влияние стрессового фактора проявляется в изменении отношения интенсивностей флуоресценции на длинах волн 685 и 740 нм, что может быть положено в основу лазерного метода контроля состояния растений.

## Список литературы

1. 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](https://doi.org/10.1366/000370210790572106)
2. 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](https://doi.org/10.1366/10-06100)
3. Gouveia-Neto A.S., Silva Jr. E.A., Costa E.B., Bueno L.A., Silva L.M.H., Granja M.M.C., Medeiros M.J.L., 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. 7568G. P. 75680G-1 - 75680G-8. DOI: [10.1117/12.839462](https://doi.org/10.1117/12.839462)
4. 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](https://doi.org/10.1117/12.841257)
5. Saito Y., Takahashi K., Nomura E., Mineuchi K., Kawahara T.D., Nomura A., Kobayashi S., Ishi H. Visualization of laser-induced fluorescence of plants influenced by environmental stress with a microfluorescence imaging system and a fluorescence imaging lidar system // Proc. of SPIE. 1997. Vol. 3059. P. 190-198. DOI: [10.1117/12.277614](https://doi.org/10.1117/12.277614)
  6. Hristov H.A., Borisova E.G., Avramov L.A., Kolev I.N. Applications of laser-induced fluorescence for remote sensing // Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4397. P. 496 - 500. DOI: [10.1117/12.425192](https://doi.org/10.1117/12.425192)
  7. Lee K.J., Park Y., Bunkin A., Nunes R., Pershin S., Voliak K. Helicopter-based lidar system for monitoring the upper ocean and terrain surface // Applied Optics. 2002. Vol. 41, no. 3. P. 401-406. DOI: [10.1364/AO.41.000401](https://doi.org/10.1364/AO.41.000401)
  8. 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, no. 4. P. 470-479. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00125-1)
  9. Grishaev M.V., Zuev V.V., Kharchenko O.V. Fluorescent channel of the Siberian Lidar Station // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6580. P. 65800U-1 - 65800U-6. DOI: [10.1117/12.724940](https://doi.org/10.1117/12.724940)
  10. 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. DOI: [10.1117/12.689612](https://doi.org/10.1117/12.689612)
  11. Заворуев В.В., Заворуева Е.Н. Флуоресценция листьев тополей, растущих вблизи автомобильных дорог // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 437-440.
  12. 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. DOI: [10.1364/AO.47.001922](https://doi.org/10.1364/AO.47.001922)
  13. 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. P. 79020A-1 - 79020A-10. DOI: [10.1117/12.872991](https://doi.org/10.1117/12.872991)
  14. 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, no. 1. P. 29-35. DOI: [10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001)
  15. Белов М.Л., Булло О.А., Городничев В.А. Лазерный флуоресцентный метод обнаружения стрессовых состояний растений, вызванных недостаточным уровнем питательных веществ или наличия загрязнителей в почве // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. С. 299-318. DOI: [10.7463/1212.0506199](https://doi.org/10.7463/1212.0506199)

16. Middleton E., McMurtrey J.E., Entcheva Campbell P.K., Corp L.A., Butchera L.M., Chappellea E.W. Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 4879. P. 72-83. DOI: [10.1117/12.463087](https://doi.org/10.1117/12.463087)
17. Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Харченко О.В., Тимофеев В.И., Клишкин В.М., Соколов В.Г., Астафурова Т.П., Зотикова А.П. Дистанционная оценка состояния фотосинтетического аппарата в растениях методом индуцированной лазерной флуоресценции // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 4. С. 334-337.
18. Lichtenthaler H.K., Rinderle U. The Role of Chlorophyll Fluorescence in the Detection of Stress Conditions in Plants // C R C Critical Reviews in Analytical Chemistry. 1988. Vol. 19, sup. 1. P. S29-S85. [10.1080/15476510.1988.10401466](https://doi.org/10.1080/15476510.1988.10401466)
19. Matvienko G.G., Grishin A.I., Kharchenko O.V., Romanovskii O.A. Remote sounding of vegetation characteristics by laser induced fluorescence // Proc. of SPIE. 1999. Vol. 3707. P. 524-532. DOI: [10.1117/12.351388](https://doi.org/10.1117/12.351388)
20. 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)

## **Experimental Study of Laser Fluorescence Method for Remote Plant Stress Sensing in Situations Induced by Mechanical Injury of Plant Root System**

Yu.V. Fedotov<sup>1</sup>, O.A. Bullo<sup>1</sup>, M.L. Belov<sup>1,\*</sup>,  
V.V. Bolvachev<sup>1</sup>, V.A. Gorodnichev<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** laser-induced fluorescence, spectra, vegetation, plant stress

---

Stress situations of plants can be caused by a lack of nutrients; mechanical injuries; diseases; low or high temperatures; a lack of illumination; insufficient or excess humidity of the soil; soil salinization; soil pollution by the oil products or heavy metals; increased soil acidity; use of pesticides, herbicides, insecticides, etc.

At the early stages to detect stress situations caused by adverse external factors by plants appearance is often difficult. However, the fluorescent analysis potentially allows us to detect stress situations of plants by the spectra distortion of the laser induced fluorescence.

The conducted experiments allows us to study a capability of the laser fluorescent method to control plants behavior in the stress situations caused by the mechanical root system injury with the exciting fluorescence wavelength being of 532 nm,.

Researches of fluorescence spectra were conducted on the created laboratory installation. As a source of the fluorescence radiation excitement the second harmonic of YAG:Nd laser is used. The subsystem to record fluorescence radiation is designed using a polychromator and highly sensitive matrix detector with the amplifier of brightness.

Experimental studies were aimed at the lawn grass.

Experimental studies of laser induced fluorescence spectra of plants for the excitement wavelength of 532 nm show that the effect of the stress factors, caused by mechanical root system injury, on the plant significantly distorts a fluorescence spectrum of plants. Influence of a stress factor is shown in the changing form of the fluorescence spectrum. Thus, the identifying factor is a ratio between the fluorescent intensities at two wavelengths of 685 and 740 nm. This can serve the basis for a laser method to control state of plants.

## References

1. 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](https://doi.org/10.1366/000370210790572106)
2. 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](https://doi.org/10.1366/10-06100)
3. Gouveia-Neto A.S., Silva Jr. E.A., Costa E.B., Bueno L.A., Silva L.M.H., Granja M.M.C., Medeiros M.J.L., 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](https://doi.org/10.1117/12.839462)
4. 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](https://doi.org/10.1117/12.841257)
5. Saito Y., Takahashi K., Nomura E., Mineuchi K., Kawahara T.D., Nomura A., Kobayashi S., Ishi H. Visualization of laser-induced fluorescence of plants influenced by environmental stress with a microfluorescence imaging system and a fluorescence imaging lidar system. *Proc. of SPIE*, 1997, vol. 3059, pp. 190-198. DOI: [10.1117/12.277614](https://doi.org/10.1117/12.277614)
6. Hristov H.A., Borisova E.G., Avramov L.A., Kolev I.N. Applications of laser-induced fluorescence for remote sensing. *Proc. of SPIE*, 2001, vol. 4397, pp. 496 - 500. DOI: [10.1117/12.425192](https://doi.org/10.1117/12.425192)
7. Lee K.J., Park Y., Bunkin A., Nunes R., Pershin S., Voliak K. Helicopter-based lidar system for monitoring the upper ocean and terrain surface. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 3, pp. 401-406. DOI: [10.1364/AO.41.000401](https://doi.org/10.1364/AO.41.000401)
8. 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, no. 4, pp. 470-479. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00125-1)
9. Grishaev M.V., Zuev V.V., Kharchenko O.V. Fluorescent channel of the Siberian Lidar Station. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6580, pp. 65800U-1 - 65800U-6. DOI: [10.1117/12.724940](https://doi.org/10.1117/12.724940)
10. 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. DOI: [10.1117/12.689612](https://doi.org/10.1117/12.689612)
11. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Fluorescence of poplar leaves, growing near the road. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*, 2011, vol. 24, no. 5, pp. 437-440. (in Russian).

12. 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. DOI: [10.1364/AO.47.001922](https://doi.org/10.1364/AO.47.001922)
13. 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](https://doi.org/10.1117/12.872991)
14. 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, no. 1, pp. 29-35. DOI: [10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001)
15. Belov M.L., Bullo O.A., Gorodnichev V.A. Laser fluorescence detection method of plant stress conditions caused by insufficient nutrients or contaminants in soil. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 12, pp. 299-318. DOI: [10.7463/1212.0506199](https://doi.org/10.7463/1212.0506199) (in Russian).
16. Middleton E., McMurtrey J.E., Entcheva Campbell P.K., Corp L.A., Butchera L.M., Chappellea E.W. Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes. *Proc. of SPIE*, 2003, vol. 4879, pp. 72-83. DOI: [10.1117/12.463087](https://doi.org/10.1117/12.463087)
17. Grishin A.I., Matvienko G.G., Kharchenko O.V., Timofeev V.I., Klimkin V.M., Sokovikov V.G., Astafurova T.P., Zotikova A.P. Remote evaluation of the state of photosynthetic mechanism in plants by the method of laser-induced fluorescence. *Optika atmosfery i okeana*, 1999, vol. 12, no. 4, pp. 334-337. (English translation: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 1999, vol. 12, no. 4, pp. 320-323.).
18. Lichtenthaler H.K., Rinderle U. The Role of Chlorophyll Fluorescence in the Detection of Stress Conditions in Plants. *C R C Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 1988, vol. 19, sup. 1, pp. S29-S85. [10.1080/15476510.1988.10401466](https://doi.org/10.1080/15476510.1988.10401466)
19. Matvienko G.G., Grishin A.I., Kharchenko O.V., Romanovskii O.A. Remote sounding of vegetation characteristics by laser induced fluorescence. *Proc. of SPIE*, 1999, vol. 3707, pp. 524-532. DOI: [10.1117/12.351388](https://doi.org/10.1117/12.351388)
20. 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. Baumana = 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) (in Russian).