

Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений для стрессовых состояний, вызванных неправильным режимом полива

04, апрель 2014

DOI: 10.7463/0414.0707937

Федотов Ю. В., Булло О. А., Белов М. Л., Городничев В. А.

УДК 504.064.36

Россия, МГТУ им. Баумана

fed@bmstu.ru

olga.bull@gmail.com

belov@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

Введение

Метод лазерно-индуцированной флуоресценции на сегодняшний день является одним из наиболее перспективных методов контроля состояния растительности (см., например, [1-15]) и обнаружения стрессовых состояний растений, вызванных различными причинами.

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

Флуоресцентный анализ потенциально позволяет обнаруживать стрессовые состояния растений по искажению спектров лазерно-индуцированной флуоресценции. Принцип действия лазерного флуориметра для контроля состояния растений основан на облучении растительности лазером в ультрафиолетовом или видимом диапазонах (для возбуждения флуоресценции), регистрации и анализе характеристик флуоресцентного излучения.

Наиболее важной информационной характеристикой флуоресценции растительности является форма спектра флуоресцентного излучения.

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции различных видов здоровой растительности и растительности в различных стрессовых ситуациях. Эти экспериментальные данные были получены различными авторами, на разной аппаратуре, при разных длинах волн возбуждения (266, 275, 280, 300-400, 308, 325, 327, 337, 340, 355, 360, 380, 395, 396, 397, 400, 400-450, 404, 405, 408, 422, 425, 428, 436, 440, 450, 452, 460, 470, 440-500, 480, 488, 500, 515, 525, 532, 535, 550, 590, 600, 627, 630, 633, 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).

Наиболее перспективным лазерным источником для создания бортовой аппаратуры контроля состояния растений является твердотельный импульсный лазер на длине волны 532 нм. 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 ИАГ имеет меньшую энергию в импульсе, чем вторая).

Поэтому не удивительно, что число работ, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований спектров флуоресценции здоровой растительности при длине возбуждения 532 нм, довольно велико (см., например, [1-4,7,12-14]).

Однако, число работ, посвященных экспериментальным исследованиям спектров флуоресценции растений в стрессовых состояниях при длине возбуждения 532 нм, мало - [5,7,10,15] (и работы этих же авторов на основе того же экспериментального материала в других изданиях).

Статья посвящена экспериментальному исследованию лазерного флуоресцентного метода обнаружения стрессовых состояний растений при длине возбуждения флуоресценции 532 нм. Такая задача представляет практический интерес для мониторинга состояния растений (например, сельскохозяйственных культур) по результатам дистанционных измерений.

1. Постановка задачи

Водный режим играет важную роль в обеспечении нормального обмена веществ и хода физиолого-биохимических процессов у растений. Ткани растений на 70—80 % состоят из воды. На образование корней, побегов, листьев, плодов и других органов растений расходуется огромное количество воды. Большая ее часть расходуется и на транспирацию — испарение через листву и внешние ткани растений.

Основной источник воды для растения — почвенная влага, именно в ней растворяются жизненно необходимые питательные вещества, образуя так называемый почвенный раствор, поступающий к растениям.

Недостаток или избыток воды нарушает нормальную жизнедеятельность растений. Избыток влаги в почве оказывает крайне неблагоприятное влияние на растения, так как происходит вытеснение из почвы кислорода и накопление углекислого газа, что приводит к угнетению и отмиранию корневой системы. При недостатке влаги (водном дефиците) в растении наблюдается перераспределение воды. Молодые листья оттягивают воду от более старых, а также от корневой системы. Отмирают корневые волоски. Усиливаются процессы опробковения корней. Указанные изменения приводят к значительному сокращению зоны, участвующей в поглощении воды, к снижению проницаемости клеток корня для воды.

Стрессовые состояния, вызванные неблагоприятными внешними факторами, часто сложно обнаружить на ранних стадиях по внешнему виду растений. Однако, флуоресцентный анализ потенциально позволяет это сделать.

В работе проводились экспериментальные исследования возможностей лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений при длине волны возбуждения 532 нм в стрессовых состояниях, вызванных неправильным режимом полива.

2. Эксперимент

Для исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений была создана лабораторная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

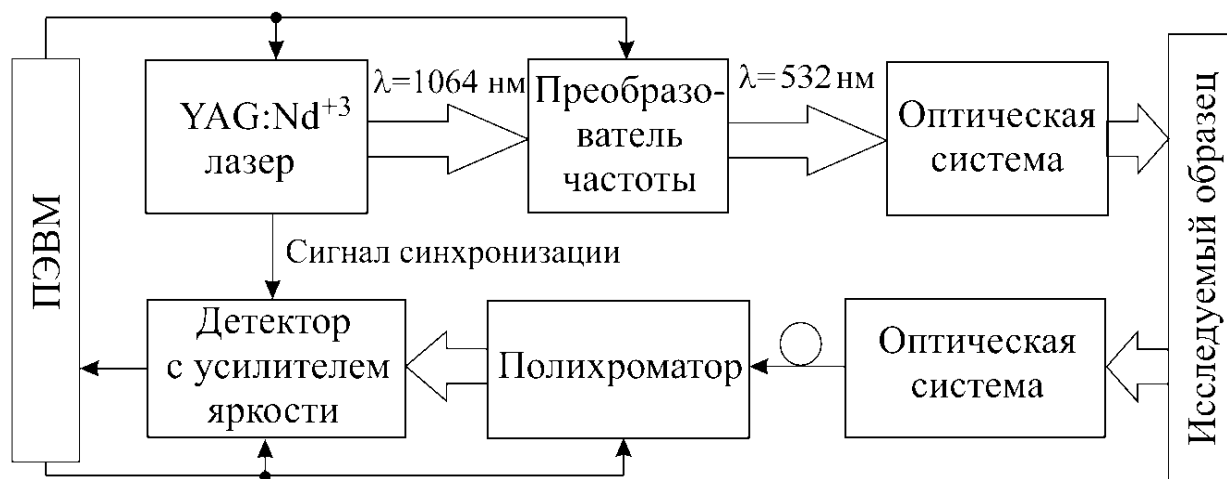


Рис. 1. Структурная схема лабораторной установки.

В качестве источника возбуждения излучения флуоресценции использована вторая гармоника YAG:Nd лазера. Подсистема регистрации излучения флуоресценции построена на основе полихроматора и высокочувствительного матричного детектора с усилителем яркости.

На установке были проведены измерения спектров флуоресценции растений в диапазоне 595 – 800 нм. Диаметр приемного объектива – 15 мм. Расстояние от лазерного источника до растений ~ 1 м.

Основные параметры лазерного источника приведены в таблице 1.

Таблица 1 Основные параметры лазера

Энергия импульса лазера, мДж	2,1
Длительность импульса, нс	<7
Длина волны, нм	532
Частота повторения, Гц	до 500
Модовый состав	TEM ₀₀
Расходимость луча, мрад	< 3
Диаметр луча, мм	0.8
Стабильность энергии в импульсе, СКО, %	< 1

Экспериментальные исследования проводились для быстрорастущих и неприхотливых видов растений – различных видов салата. Для посадки использовался универсальный почво-грунт Compo Sana.

На рис. 2 представлена фотография образцов кресс-салата, с которыми проводились эксперименты по влиянию водного дефицита.



Рис. 2. Внешний вид образцов кресс-салата, которые не поливались 3 дня

На рис. 3 представлена фотография образцов кресс-салата, с которыми проводились эксперименты по влиянию избыточного полива.



Рис.3 . Внешний вид образцов кресс-салата при избыточном поливе 17 дней

3. Анализ полученных экспериментальных данных

На рис. 4 - 8 приведены характерные примеры измеренных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции кресс-салата в стрессовых состояниях, вызванных избытком влаги в почве.

На рис. 4 - 6 показаны усредненные (по трем образцам растений и по трем измерениям для каждого образца) спектры флуоресценции кресс-салата в стрессовых состояниях, вызванных избыточным поливе в течении 11, 17 и 24 дней, соответственно. На рисунках кривая 1 – спектр флуоресценции контрольного растения при нормальном поливе, кривая 2 - спектр флуоресценции растения при избыточном поливе.

При проведении этого цикла измерений горшок с растением (при избыточном поливе) помещался в горшок большего размера, в который наливалась вода. Уровень воды в большом горшке была несколько ниже уровня почвы в горшке с растением, так что по внешнему виду горшка с растением было не видно, что корни растения находятся постоянно в переувлажненной почве.

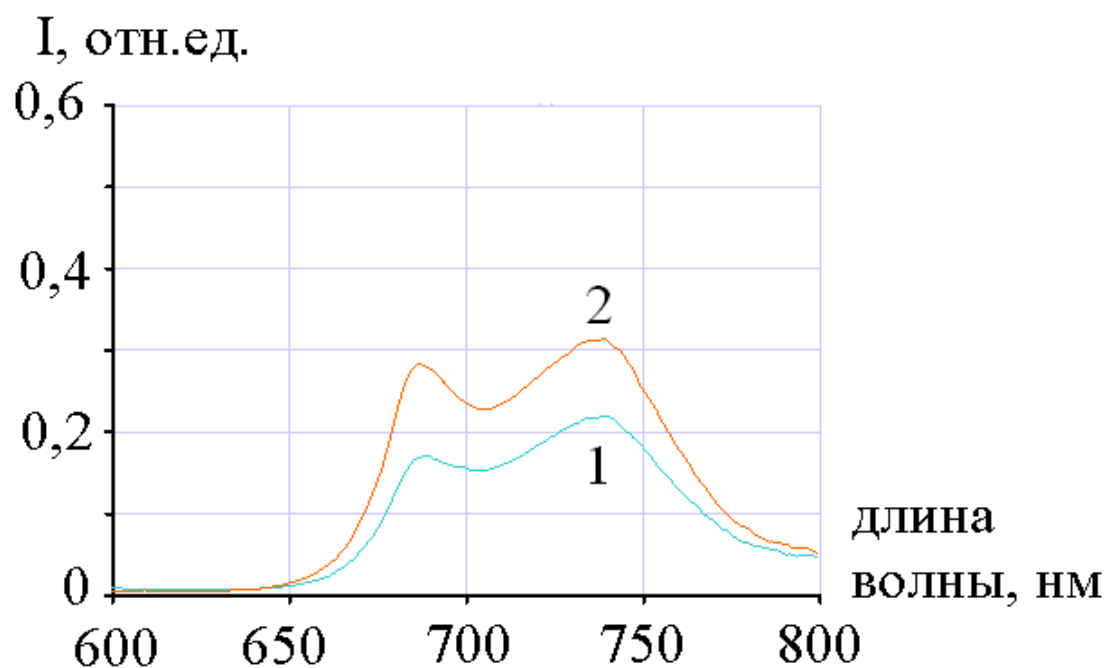


Рис.4 Усредненные спектры флуоресценции салата в нормальном и стрессовом состоянии при избыточном поливе в течение 11 дней

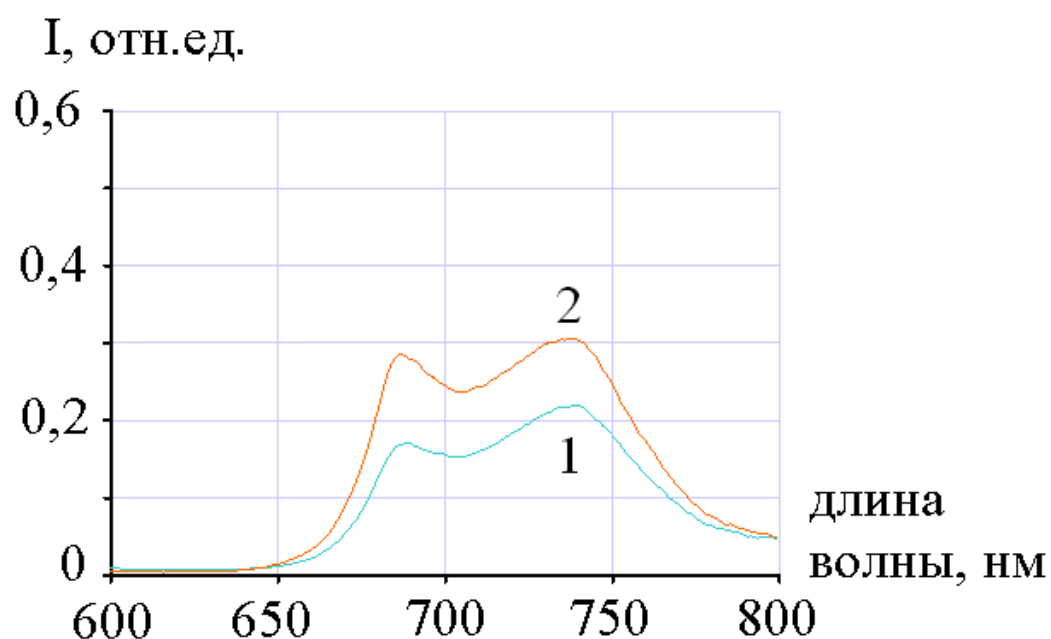


Рис.5 Усредненные спектры флуоресценции салата в нормальном и стрессовом состоянии при избыточном поливе в течение 17 дней

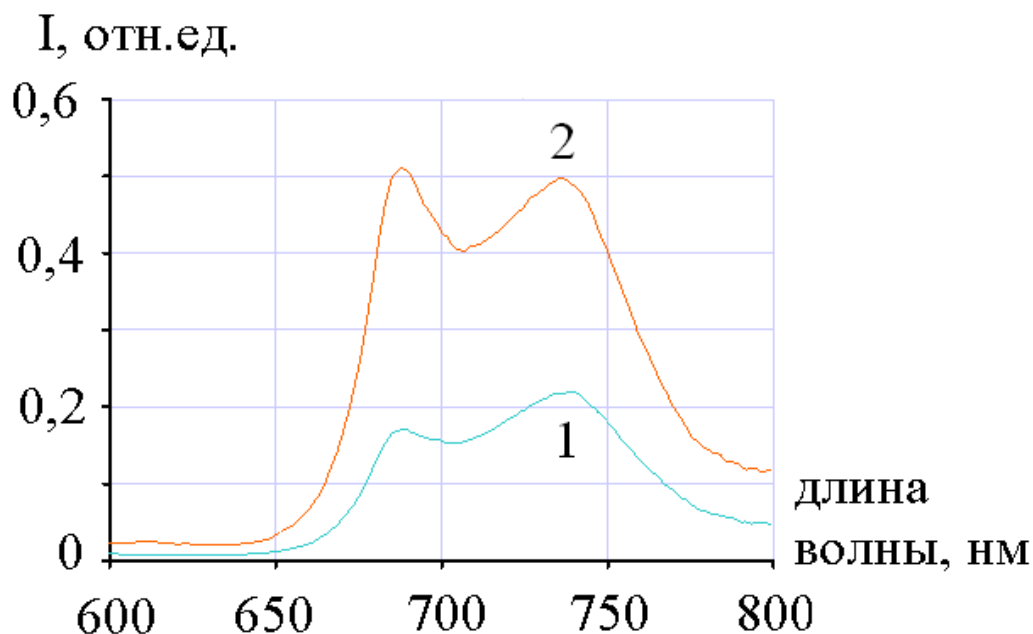


Рис.6 Усредненные спектры флуоресценции салата в нормальном и стрессовом состоянии при избыточном поливе в течение 24 дней

На рисунке 6 хорошо видно, что измеренные уровни флуоресценции для растений при избыточном поливе в течение 24 дней (кривая 2) существенно выше уровня флуоресценции для растений при нормальном поливе. Этот эффект характерен для первой фазы стресса растений – первичной индуктивной стрессовой реакции [16]. Для этой стадии характерно уменьшение интенсивности фотосинтеза, что сопровождается существенным увеличением интенсивности флуоресценции хлорофилла.

На рисунке 6 также хорошо видно, что отношение $R_{680/740}$ интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 и 740 нм для растения в стрессовом состоянии (вызванном избытком влаги в почве) больше единицы, а величина $R_{680/740}$ для растения в нормальном состоянии (при нормальном поливе) меньше единицы. Этот эффект (изменения формы спектра флуоресценции для растений в стрессовом состоянии) связывают с колебаниями активности фотосистемы II, которые приводят к изменениям отношения интенсивностей флуоресценции в красной (680 нм) и дальней красной (740 нм) областях [17].

На рисунках 4 и 5 кривые 2 (соответствующие избыточному поливу растений в течение 11 и 17 дней) показывают скорее не стрессовое состояние растения, а промежуточное состояние (между точно нормальным и точно стрессовым).

На рисунках 7 и 8 приведены спектры флуоресценции салата полученные при отдельных измерениях (разные спектры на рисунках соответствуют разным одиночным из-

мерениям). На рисунке 7 – для растений в нормальном состоянии, на рисунке 8 – для растений в стрессовом состоянии при избыточном поливе в течение 24 дней.

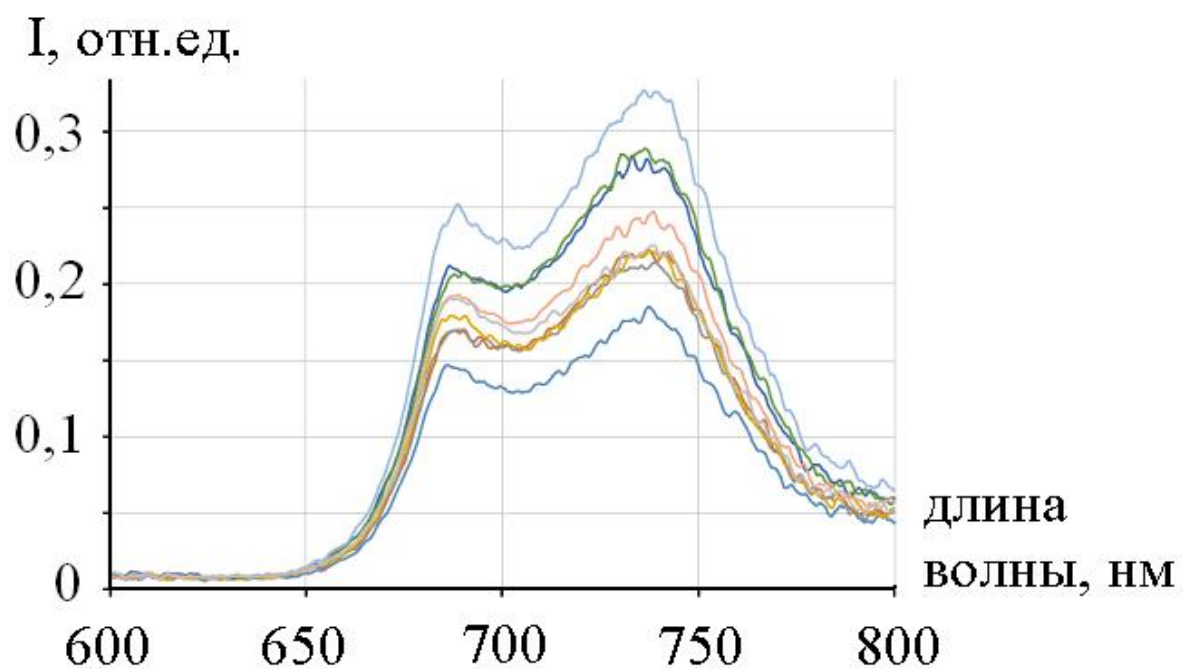


Рис.7 Спектры флуоресценции салата в нормальном состоянии

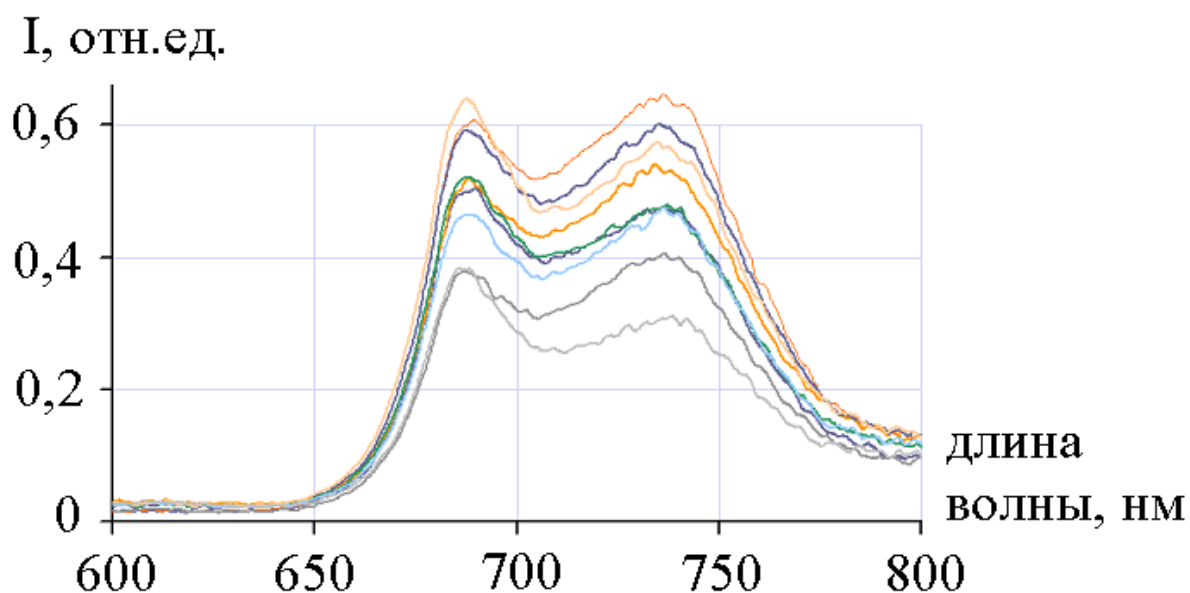


Рис.8 Спектры флуоресценции салата в стрессовом состоянии при избыточном поливе в течение 24 дней

Из рисунков хорошо видно, что для всех одиночных измерений уровни флуоресценции для растений при избыточном поливе в течение 24 дней существенно выше уровня флуоресценции для растений при нормальном поливе (по крайней мере для длины волны 680 нм). Кроме того что для всех одиночных измерений отношение $R_{680/740}$ для растения в стрессовом состоянии существенно больше, чем величина $R_{680/740}$ для растения в нормальном состоянии.

Таким образом, стрессовые состояния растений хорошо проявляются как для усредненных по разным измерениям спектров флуоресценции, так и для спектров одиночных измерений.

Измерения спектров флуоресценции кресс-салата проводились и при недостатке влаги (образцы салата не поливались). Однако, измеренные спектры флуоресценции растений практически не менялись для периодов времени (когда растения не поливали) от двух до семи дней. Этот результат понятен, так как эксперименты проводились ранней весной, когда потребность растений во влаге мала.

На рис. 9 приведены усредненные (по трем образцам растений и по трем измерениям для каждого образца) спектров флуоресценции кресс-салата в стрессовом состоянии (или близким к стрессовому), вызванном поливом растения после длительного (в течение 7 дней) отсутствия полива (полив проводился сверху, пока почва не становилась влажной). На рисунке кривая 1 – спектр флуоресценции контрольного растения при нормальном поливе, кривая 2 - спектр флуоресценции растения до полива, кривая 3 - спектр флуоресценции растения после полива (измерения проводились в течение 2-3 часов после полива). Спектры флуоресценции салата полученные при отдельных измерениях приведены на рисунке 10.

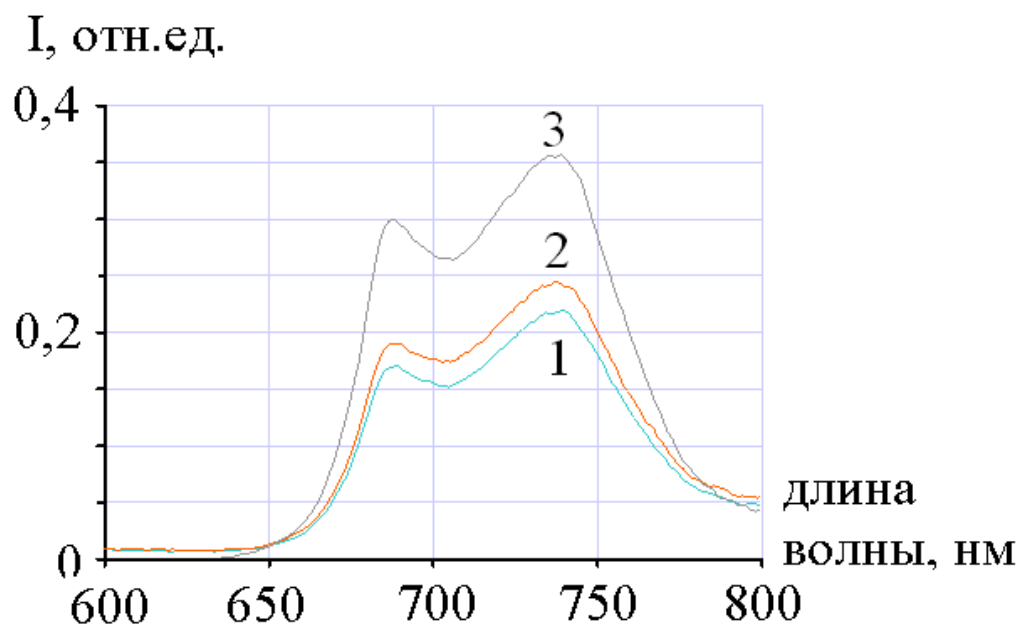


Рис.9 Усредненные спектры флуоресценции салата в нормальном состоянии и в ситуации, вызванной поливом растения после длительного отсутствия полива.

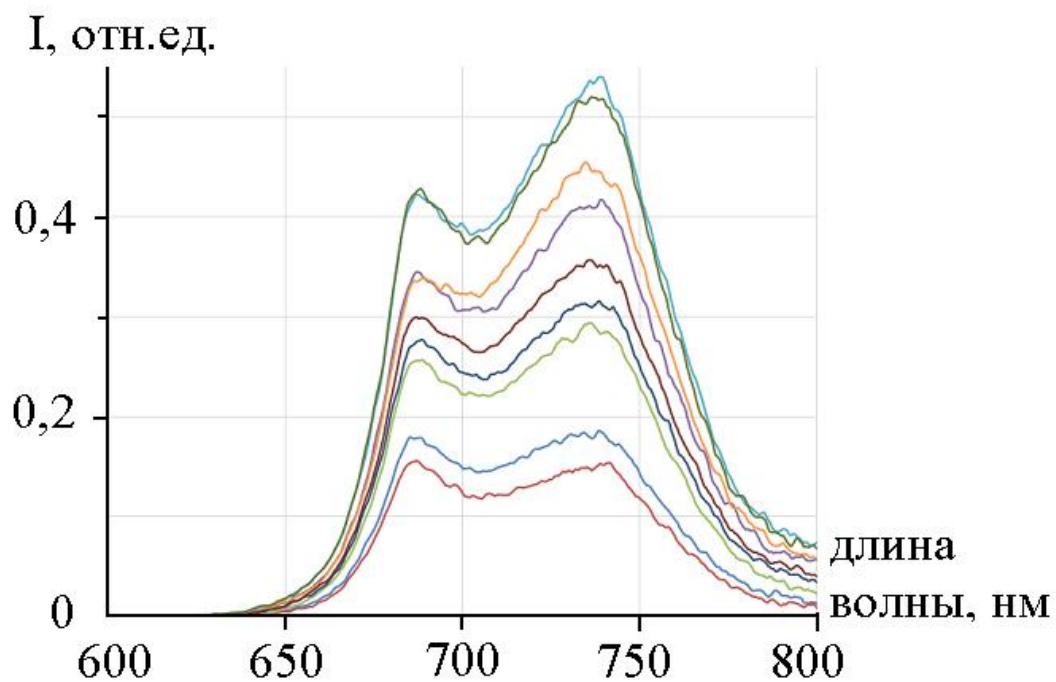


Рис.10 Спектры флуоресценции салата в ситуации, вызванной поливом растения после длительного отсутствия полива.

Рисунок 9 показывает увеличение уровня интенсивности флуоресценции, что характерно для стрессового состояния растений (при этом форма спектра флуоресценции меняется мало).

Однако, сравнение спектров флуоресценции салата полученных при отдельных измерениях в ситуации, вызванной поливом растения после длительного отсутствия полива, (см. рис.10) и спектров флуоресценции салата в нормальном состоянии (см. рис. 7) показывает, что здесь (на рис. 10) скорее промежуточный вид спектра флуоресценции (между точно нормальным и точно стрессовым). Форма спектра флуоресценции на рисунке 10 (по сравнению с рис. 7) меняется мало, а более узкий диапазон изменений интенсивности флуоресценции для рис. 7 полностью укладывается в более широкий диапазон изменений интенсивности флуоресценции для рис. 10.

Заключение

Таким образом, экспериментальные исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений для длины волны возбуждения 532 нм показывают, что воздействие на растение стрессовых факторов, вызванных неправильным режимом полива, существенно искажает спектр флуоресценции растений. Влияние стрессового фактора может проявляться в изменении формы спектра флуоресценции (идентифицирующим фактором при этом является отношение интенсивностей флуоресценции на двух длинах волн 685 и 740 нм) или (и) в изменении уровня флуоресценции, что может быть положено в основу лазерного метода контроля состояния растений.

Список литературы

1. 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)
2. 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.
3. 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.
4. 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)
5. 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)
6. Заворуев В.В., Заворуева Е.Н. Флуоресценция листьев тополей, растущих вблизи автомобильных дорог // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 437-440.

7. 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.
8. Gouveia-Neto A.S., Silva 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)
9. 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.
10. 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)
11. 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.
12. 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.
13. Saito Y., Saito R., Nomura E., Kawahara T.D., Nomura A., Takaragaki S., Ida K., Takeda S. Performance Check of Vegetation Fluorescence Imaging Lidar through In Vivo and Remote Estimation of Chlorophyll Concentration Inside Plant Leaves // *Optical Review*. 1999. Vol. 6, no 2. P. 155-159.
14. 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.
15. Barbini R., Colao F., Fantom R., Palucci F., Ribezzo S. Laser remote monitoring of the plant photosynthetic activity // *Proc. of SPIE*. 1995. Vol. 2585. P. 57-65. DOI: [10.1117/12.227169](https://doi.org/10.1117/12.227169)
16. Яковец О.Г. Фитофизиология стресса. Минск: БГУ, 2010. 103 с.
17. 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.

Experimentally studied laser fluorescence method for remote sensing of plant stress situation induced by improper plants watering

04, April 2014

DOI: 10.7463/0414.0707937

Fedotov Yu.V., Bullo O.A., M.L. Belov, V.A. Gorodnichev

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

fed@bmstu.ru

olga.bull@gmail.com

belov@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

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

At early stages it is often difficult to detect seemingly that the plants are in stressful situations caused by adverse external factors. However, the fluorescent analysis potentially allows detection of the stressful situations of plants by deformation of laser-induced fluorescence spectra. The paper conducts experimental investigations to learn the capabilities of the laser fluorescent method to monitor plant situations at 532nm wavelength of fluorescence excitation in the stressful situations induced by improper watering (at excess of moisture in the soil and at a lack of moisture).

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

Experimental investigations have been conducted for fast-growing and unpretentious species of plants, namely different sorts of salad.

Experimental studies of laser-induced fluorescence spectra of plants for 532nm excitement wavelength show that the impact of stressful factors on a plant due to the improper water-

ing, significantly distorts a fluorescence spectrum of plants. Influence of a stressful factor can be shown as a changing profile of a fluorescence spectrum (an identifying factor, here, is a relationship of fluorescence intensities at two wavelengths, namely 685 nm and 740 nm) or (and) as a changing level of fluorescence that can be the basis for the laser method for monitoring the plant situations.

Publications with keywords: [fluorescence](#), [plant](#), [laser method](#), [detection of plant stress](#)

Publications with words: [fluorescence](#), [plant](#), [laser method](#), [detection of plant stress](#)

References

1. 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](#)
2. 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.
3. 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.
4. 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](#)
5. 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](#)
6. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. [Fluorescence of poplar leaves, growing near the road 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).
7. 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.
8. Gouveia-Neto A.S., Silva 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](#)

9. 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.
10. 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)
11. 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.
12. 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.
13. Saito Y., Saito R., Nomura E., Kawahara T.D., Nomur A., Takaragaki S., Ida K., Takeda S. Performance Check of Vegetation Fluorescence Imaging Lidar through In Vivo and Remote Estimation of Chlorophyll Concentration Inside Plant Leaves. *Optical Review*, 1999, vol. 6, no 2, pp. 155-159.
14. Afonasenkov A.V., Iglakova A.N., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Prokop'ev V.E. [Laboratory and lidar measurements of birch leaves spectral characteristics in different periods of vegetation]. *Optika atmosfery i okeana - Atmospheric and oceanic optics*, 2012, vol. 25, no. 3, pp. 237-243. (in Russian).
15. Barbini R., Colao F., Fantom R., Palucci F., Ribezzo S. Laser remote monitoring of the plant photosynthetic activity. *Proc. of SPIE*, 1995, vol. 2585, pp. 57-65. DOI: [10.1117/12.227169](https://doi.org/10.1117/12.227169)
16. Yakovets O.G. *Fitofiziologiya stressa* [Phyto-physiology of stress]. Minsk, BSU Publ., 2010. 103 p. (in Russian).
17. Lysenko V.S., Varduni T.V., Soier V.G., Krasnov V.P. [Plant chlorophyll fluorescence as an environmental stress characteristic: a theoretical basis of the method application]. *Fundamentalnie issledovaniâ - Fundamental research*, 2013, no. 4, pp. 112-119. (in Russian).