

## Контроль стрессовых состояний растений при возбуждении флуоресценции в синей области спектра

# 01, январь 2014

DOI: 10.7463/0114.0636811

Белов М.Л., Владимирский Д.В., Городничев В.А., Стрелков Б.В.

УДК 504.064.36

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

[ekomonit@bmstu.ru](mailto:ekomonit@bmstu.ru)

### Введение

Отсутствие или недостаточный уровень питательных веществ, наличие антропогенных загрязнений в почве или неблагоприятные внешние условия приводит к стрессовым состояниям растений и к невозможности их нормального роста.

Стрессовые состояния растений сложно распознать на ранних стадиях по внешнему виду растения, поэтому важна разработка методов и приборов их раннего обнаружения.

Эффективным дистанционным или неконтактным методом обнаружения стрессовых состояний растительности является метод, основанный на регистрации флуоресценции при возбуждении ее излучением в ультрафиолетовом или видимом спектральных диапазонах.

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции различных видов здоровой растительности и растительности в различных стрессовых состояниях: недостаточная или избыточная влажность; механические повреждения; низкие или высокие температуры; недостаток питательных веществ; недостаток освещенности; засоление почвы; загрязнение почвы нефтепродуктами; повышенная кислотность почвы; использование пестицидов, гербицидов, инсектицидов и др. (см., например, [1-5])

Эти экспериментальные данные были получены на разной аппаратуре, при 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.

Важной задачей на сегодняшний день является определение наиболее перспективных (для контроля стрессовых состояний растений) длин волн возбуждения и регистрации флуоресцентного

излучения.

### Постановка задачи

Одним из перспективных вариантов построения неконтактной автоматизированной флуоресцентной системы контроля стрессовых состояний растений (например, для теплиц) является измерительная система, использующая для возбуждения флуоресценции растений излучение кварцевой лампы или лазерного диода (светодиода) в синей области спектра.

Важнейшими компонентами фотосинтетического аппарата растений являются пигменты. Пигменты поглощают видимый свет не полностью, а избирательно, т.е. каждый пигмент имеет свой характерный спектр поглощения. Основным функциональным пигментом растений является хлорофилл. Важнейшая особенность спектра поглощения хлорофилла «а» и «b» – наличие у них двух ярко выраженных максимумов: в красной и в сине-фиолетовой областях спектра [7,8] (рисунок 1).

Обычно рекомендуется, выбирать оптимальную область возбуждения флуоресценции в максимуме поглощения вещества и, если возможно, расположенную дальше от полосы флуоресценции. Поэтому для хлорофилла рекомендуется, выбирать оптимальную область возбуждения в синей области спектра [9].

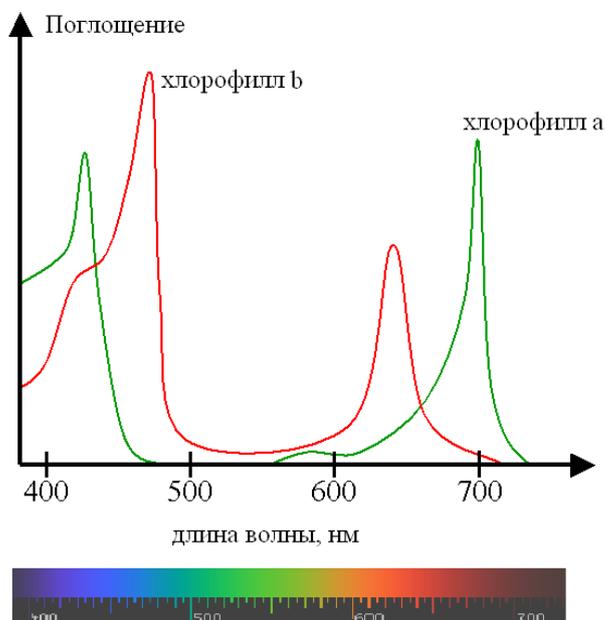


Рис.1. Спектры поглощения хлорофилла «а» и «b»

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции

различных видов здоровой растительности и растительности в различных стрессовых состояниях при возбуждении флуоресценции в синей области спектра [10-19].

Цель работы - анализ возможностей флуоресцентного метода контроля состояний растений при возбуждении флуоресценции в синей области спектра и определение (на основе этого анализа) спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для надежного обнаружения стрессовых состояний растений.

### **Анализ спектров флуоресценции растений находящихся в нормальном и стрессовом состоянии**

Для примера на рисунках 2-4 [10] показаны характерные спектры флуоресценции здоровой растительности и растительности в различных стрессовых состояниях при возбуждении флуоресценции в синей области спектра. На рисунках показана спектральная зависимость интенсивности флуоресценции в относительных единицах.

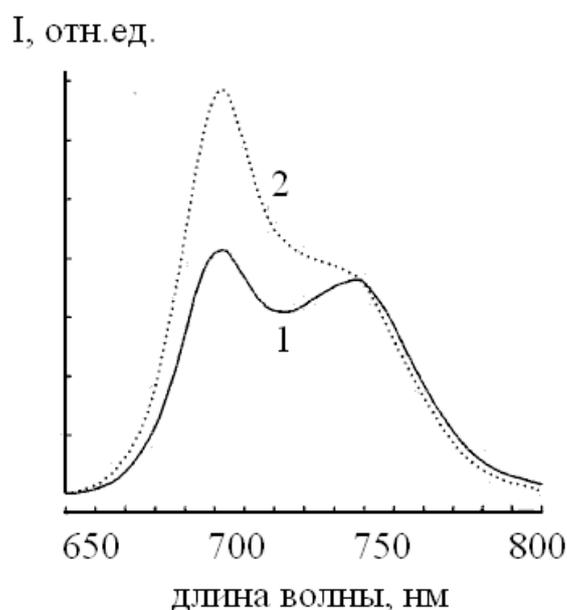


Рис.2. Спектры флуоресценции листьев сахарной кукурузы (*Zea mays*)

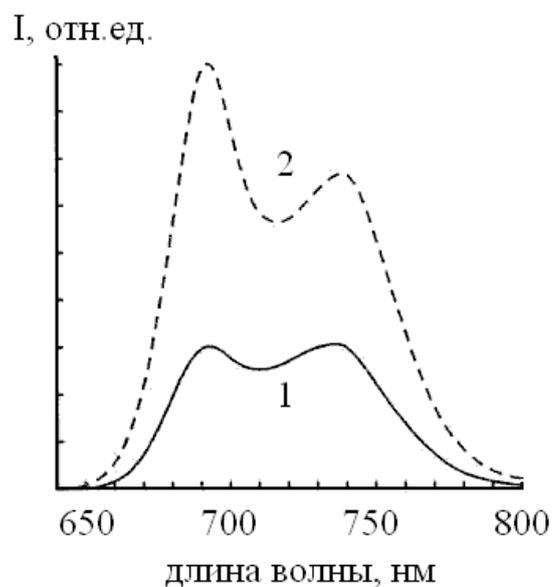


Рис.3. Спектры флуоресценции листьев редьки (*Raphanus*)

На рисунке 2 приведены спектры флуоресценции листьев сахарной кукурузы (*Zea mays*). На рисунке кривая 1 соответствует случаю полной минеральной подкормки растения, а кривая 2 – при дефиците азотных удобрений.

На рисунке 3 приведены спектры флуоресценции листьев редьки (*Raphanus*). На рисунке кривая 1 соответствует контрольному экземпляру растения (без использования гербицида), а кривая 2 – при использовании гербицида DCMU.

На рисунке 4 приведены спектры флуоресценции листьев бука (*Fagus*). На рисунке кривая 1 соответствует контрольному экземпляру растения, кривые 2-5 соответствуют стрессовому состоянию, вызванному недостатком воды: при недостатке воды в течение 2 часов (кривая 2), 6 часов (кривая 3), 24 часов (кривая 4) и 36 часов (кривая 5).

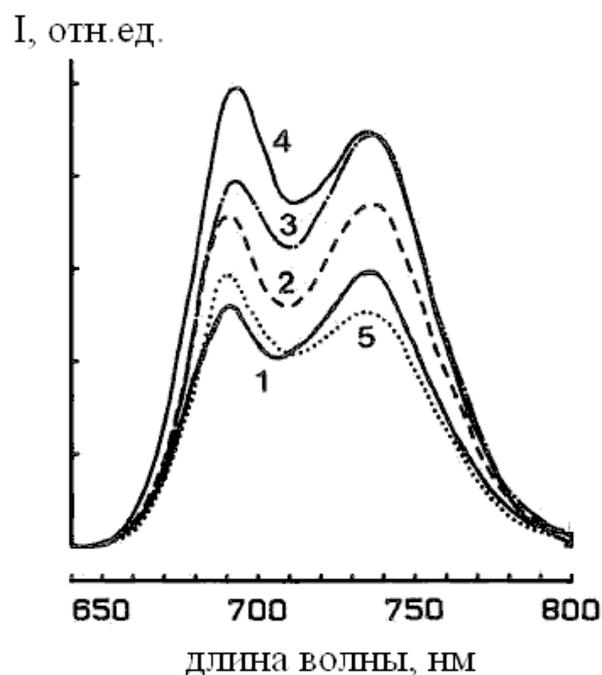


Рис.4. Спектры флуоресценции листьев бука (*Fagus*)

Из рисунков 2-4 хорошо видно, что для растений в стрессовом состоянии характерно увеличение отношения интенсивности флуоресценции на длинах волн 680...690 к интенсивности флуоресценции на длинах волн 730...740 нм (на это указывалось ранее в работах разных авторов – см., например, [2-4,10]).

Таким образом, поскольку спектры флуоресценции здоровой растительности отличаются от спектров флуоресценции растительности в стрессовых ситуациях, это дает возможность обнаруживать стрессовые состояния растительности путем регистрации спектра флуоресценции.

**Определение спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для надежного обнаружения стрессовых состояний растительности при возбуждении флуоресценции растений в синей области спектра**

Для цели оперативного (рутинного) контроля состояния растений не подходит флуориметр, регистрирующий спектр флуоресценции в широком спектральном диапазоне. Такой флуориметр хорош для научных исследований, для работы в лаборатории и т.п. Его несомненные достоинства имеют и обратную сторону: он сложен, дорог, требует высококвалифицированного персонала (как для работы с флуориметром, так и для обработки и анализа данных измерений).

Для штатного контроля состояния растений, например, в теплицах, требуется менее дорогой

и сложный прибор, не требующий высококвалифицированного персонала. Естественным вариантом такого измерителя является прибор, регистрирующий флуоресцентное излучение на нескольких длинах волн и проводящий автоматически обработку данных измерений в масштабе времени близком к реальному.

Анализ наиболее перспективных длин волн регистрации флуоресцентного излучения и исследование вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растительности проводилось методом математического моделирования.

При математическом моделировании использовались экспериментально полученные [10,16-19] спектры флуоресценции (в диапазоне длин волн 600..800 нм) различных видов здоровой растительности (листьев маиса, табака, гинкго билоба, редиса, фасоли, риса, листьев деревьев - сливы, бука, вяза, пихты, дуба, и др.) и растительности, находящейся в стрессовом состоянии при возбуждении флуоресценции в синей области спектра на длинах волн 450, 470, 480 и 488 нм.

На первом этапе работы исследовались вероятности правильного обнаружения и ложных тревог при использовании одного идентифицирующего признака (позволяющего определять состояние растения – растение в нормальном или в стрессовом состоянии). В качестве идентифицирующего признака использовалось отношение интенсивностей флуоресценции на двух длинах волн

$$R_{\lambda_1/\lambda_2} = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)},$$

где  $I(\lambda)$  - значение интенсивности флуоресценции на длине волны  $\lambda$ .

Вероятности правильного обнаружения и ложных тревог существенно зависят от выбора конкретных длин волн  $\lambda_1, \lambda_2$ .

На рисунках 5 и 6 показаны отношения  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$  для экспериментальных спектров флуоресценции растений. Каждая точка на рисунке соответствует одному из спектров. Номера спектров с 1 по 15 соответствуют растениям в стрессовом состоянии, а номера спектров с 16 по 38 - растениям в нормальном состоянии. Прямая линия на рисунке 5 соответствует значению  $R_{680/740} = 0,779$ , а на рисунке 6 - значению  $R_{690/740} = 1,11$ .

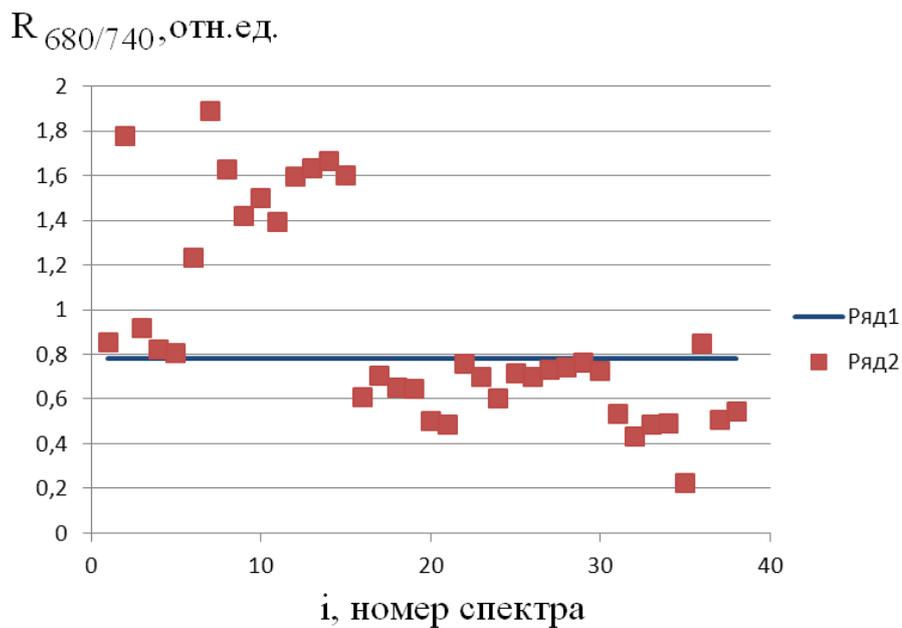


Рис.5. Отношение  $R_{680/740}$  для спектров растений

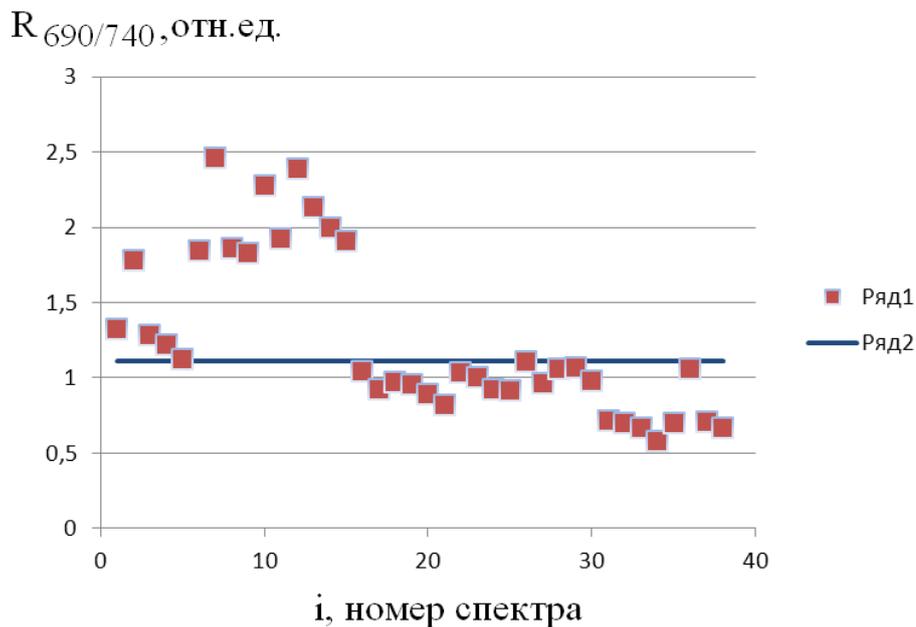


Рис.6. Отношение  $R_{690/740}$  для спектров растений

Результаты математического моделирования для идентифицирующих признаков  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$  в условиях шума измерения приведены в Таблицах 1 и 2.

Результаты математического моделирования для идентифицирующего признака  $R_{680/740}$

Ср.кв. значение шума, %	Вероятность правильного обнаружения, %	Вероятность ложных тревог, %
0	100	4,3
1	99,4	4,8
2	98,1	6,3
3	97,0	8,0
4	96,1	9,5

Таблица 2

Результаты математического моделирования для идентифицирующего признака  $R_{690/740}$

Ср.кв. значение шума, %	Вероятность правильного обнаружения, %	Вероятность ложных тревог, %
0	100	0
1	97,0	2,5
2	96,8	3,2
3	96,7	4,9
4	96,3	6,5

В таблицах приведены вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растений (вероятности принятия решения о наличии стрессовых состояний растений, когда они действительно имеют место) и ложных тревог (вероятности принятия решения о наличии стрессовых состояний растений, когда их в действительности нет) при разной величине относительного среднеквадратического значения шума измерения (при моделировании использовались  $5 \cdot 10^4$  шумовых реализаций).

Для принятия решения об обнаружении стрессовых состояний растений использовались

пороговые алгоритмы принятия решений. В Таблице 1 приведены результаты математического моделирования для идентифицирующего признака  $R_{680/740}$  и порога равного 0,779 (если идентифицирующий признак  $R_{680/740}$  меньше 0,779, то растение находится в нормальном состоянии; если  $R_{680/740}$  больше 0,779 - на растение действует некоторый стрессовый фактор). В Таблице 2 приведены результаты математического моделирования для идентифицирующего признака  $R_{690/740}$  и порога равного 1,11 (если идентифицирующий признак  $R_{690/740}$  меньше 1,11, то растение находится в нормальном состоянии; если  $R_{690/740}$  больше 1,11 - на растение действует некоторый стрессовый фактор).

Пороговые значения в обоих случаях (для идентифицирующих признаков  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$ ) выбирались на равном удалении от ближайших элементов двух классов «растения в нормальном состоянии» и «растения в стрессовом состоянии» [20] (т.е. равноудаленными как от наименьшего значения идентифицирующего признака для растений в стрессовом состоянии, так и от наибольшего значения идентифицирующего признака для здоровых растений).

Из рисунков 5, 6 и таблиц 1, 2 видно, что измерение одного идентифицирующего признака  $R_{680/740}$  или  $R_{690/740}$  не является достаточным для надежного определения в каком состоянии находится растение – в нормальном или стрессовом (вероятности ложных тревог для идентифицирующих признаков  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$  велики и составляют соответственно 9,5 % и 6,5 %).

Уменьшить вероятность ложных тревог при обнаружении стрессовых состояний растений можно, используя не один, а два идентифицирующих признака.

Такой парой идентифицирующих признаков могут быть  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$ . На рисунке 7 показаны экспериментальные спектры флуоресценции растений на двумерной плоскости идентифицирующих признаков  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$ .

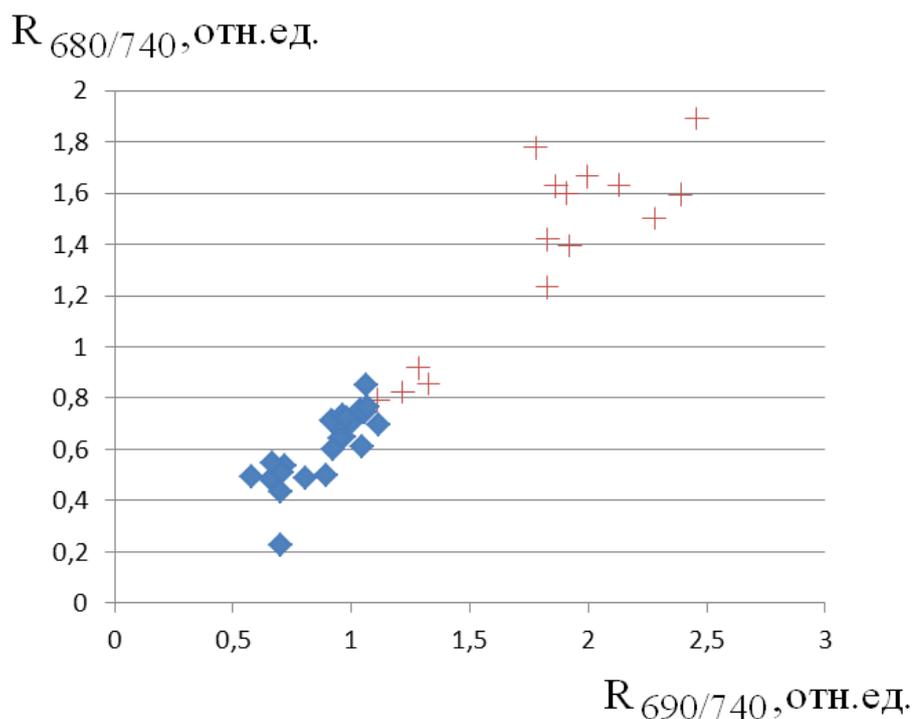


Рис.7. Идентифицирующие признаки  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$  для спектров растений

На рисунке 7 каждая точка (маркер в виде ромбика или крестика) соответствует одному из спектров. Спектры растений, находящихся в нормальном состоянии, обозначены ромбиками цвета, а спектры растений, находящихся в стрессовом состоянии – крестиками.

Для принятия решения об обнаружении стрессовых состояний растений использовался пороговый алгоритм:

- если идентифицирующий признак  $R_{680/740}$  больше порогового значения 0,779 и одновременно идентифицирующий признак  $R_{690/740}$  больше порогового значения 1,11, то на растение действует некоторый стрессовый фактор;

- в противном случае (в других областях значений идентифицирующих признаков  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$ ) растение находится в нормальном состоянии.

Результаты математического моделирования при использовании двух идентифицирующих признаков  $R_{680/740}$  и  $R_{690/740}$  приведены в таблице 3.

Таблица 3

Ср.кв. значение шума, %	Вероятность правильного обнаружения, %	Вероятность ложных тревог, %
0	100	0
1	96,8103	0,0117
2	96,1769	0,5404
3	95,3128	1,5122
4	94,3222	2,5042

Результаты, приведенные в таблице 3 показывают, что использование двух идентифицирующих признаков позволяет существенно увеличить вероятность правильного обнаружения стрессовых состояний растений (при среднеквадратическом значении шума 4 % вероятность правильного обнаружения стрессовых состояний растений составляет 94,3 % при вероятности ложных тревог 2,5 %).

### Заключение

Анализ спектров флуоресценции и результаты математического моделирования показывают, что флуоресцентный метод, основанный на возбуждении флуоресценции в синей области спектра и регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 680, 690 и 740 нм позволяет надежно обнаруживать стрессовые состояния растительности.

### Список литературы

1. 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)
2. Фатеева Н.Л., Клишкин А.В., Бендер О.В., Зотикова А.П., Ямбуров М.С. Исследование лазерно-индуцированной флуоресценции хвойных и лиственных растений при азотном загрязнении почвы // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 2-3. С. 212-215.
3. Belasque J., Gasparoto Jr. 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.

4. 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 / A.S. Gouveia-Neto [et al.] // Proceedings of SPIE. 2011. Vol. 7902. P. 79020A-1 - 79020A-10. DOI: 10.1117/12.872991
5. Белов М.Л., Булло О.А., Матросова О.А., Федотов Ю.В., Городничев В.А. Лазерный флуоресцентный метод обнаружения стрессовых состояний растений, вызванных механическими повреждениями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. вып. № 9 “Современные проблемы оптотехники”. С. 115-121.
6. Федотов Ю.В., Булло О.А., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля стрессовых состояний растений, вызванных наличием загрязнителей в почве // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 5. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/565060.html> (дата обращения 01.09.2013).
7. Воскресенская О.Л., Грошева Н.П., Сkochилова Е.А. Физиология растений. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2008. 148 с.
8. Хлорофилл. Википедия. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Хлорофилл> (дата обращения 01.09.2013).
9. Изучение спектров флуоресценции и кинетики индукции флуоресценции фотосинтезирующих организмов // МГУ. Биологический фак-т. Каф. Биофизики: сайт. Режим доступа: <http://www.biophys.msu.ru/material/mprac/3.pdf> (дата обращения 01.09.2013).
10. 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.
11. Kancheva R., Borisova D. Vegetation Stress Indicators Derived From Multispectral And Multitemporal Data // Space Technol. 2007. Vol. 26, no. 3. P. 1-8.
12. Buschmann C. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves // Photosynth. Res. 2007. Vol. 92. P. 261-271.
13. Gouveia-Neto A.S., Silva Jr. E.A., Costa E.B., Bueno L.A., Silva L.M.N., 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. P. 75680G-1 - 75680G-8. DOI: 10.1117/12.839462
14. Kancheva R., Borisova D., Пиев I. Chlorophyll fluorescence as a plant stress indicator // Proceedings of the Fifth National Conference. Space Research Institute – Russian Academy of Sciences. Moscow: Azbuka-2000 Ltd., 2008. Vol. 5. P. 301-306.
15. Krezhova D. Spectral Remote Sensing of the Responses of Soybean Plants to Environmental Stresses // In: Soybean - Genetics and Novel Techniques for Yield Enhancement / Krezhova D. (ed.). InTech Publ., 2011. Vol. 5. P. 215-265.

16. Wen Li Chen, YuHua Bi, Qiang Li, Quan Zhou, Da Xing. Changes of Delayed Luminescence and CLSM Imaging of Chlorophyll Autofluorescence during Petal Development in *Gerbera hybrida* // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6441. P. 64411X-1 - 64411X-7. DOI: 10.1117/12.717026
17. Agati G., Biagi C., Mazzinghi P. Detection of the in vivo chlorophyll fluorescence spectrum: effects of environmental factors and laser excitation parameters // Proc. of SPIE. 1997. Vol. 3107. P. 33-39. DOI: 10.1117/12.274733
18. Cecchi G., Bazzani M., Pantani L. Fluorescence lidar remote sensing of vegetation // Proc. of SPIE. 1995. Vol. 2585. P. 48-56. DOI: [10.1117/12.227168](https://doi.org/10.1117/12.227168)
19. Hoge F.E., Swift R. N., Yungel J. K. Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plants // Applied Optics. 1983. Vol. 22, no. 19. P. 2991-3000.
20. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

## Remote control of plants state under stress at fluorescence excitation in blue spectral range

# 01, January 2014

DOI: [10.7463/0114.0636811](https://doi.org/10.7463/0114.0636811)

Belov M.L., Vladimirskiy D.V., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V.

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

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

The authors analyzed laser-induced fluorescence spectra of healthy vegetation and greenery under stress at fluorescence excitation in blue spectral range. It is shown that use of fluorescence excitation in blue spectral range and registration of fluorescent radiation in three narrow spectral ranges with central wavelengths of 680, 690 and 740 nm allows reliable detection of vegetation stress. Identifiable characteristics of plant stress situation are radiation fluorescence intensity ratio at wavelengths 680, 740 nm and ratio at wavelengths 690, 740 nm.

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

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

### References

1. 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)
2. Fateeva N.L., Klimkin A.V., Bender O.V., Zotikova A.P., Iamburov M.S. Issledovanie lazerno-indutsirovanoi fluorestsentsii khvoinykh i listvennykh rastenii pri azotnom zagriaznenii pochvy [The study of laser-induced fluorescence of conifers and deciduous plants in the nitrogen pollution of the soil]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2006, vol. 19, no. 2-3, pp. 212-215.
3. Belasque J., Gasparoto Jr. 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.
4. 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)

5. Belov M.L., Bullo O.A., Matrosova O.A., Fedotov Iu.V., Gorodnichev V.A. Lazernyi fluorestsentnyi metod obnaruzheniia stressovykh sostoianii rastenii, vyzvannykh mekhanicheskimi povrezhdeniiami [Laser fluorescence method of detection of stress conditions of plants caused by mechanical damage]. *Vestnik MGTU. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2012, *Spec. iss. no. 9 "Sovremennye problemy optotekhniki"* [Modern problems of optical engineering], pp. 115-121.
6. Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Eksperimental'noe issledovanie lazernogo fluorestsentnogo metoda kontrolya stressovykh sostoyaniy rasteniy, vyzvannykh nalichiem zagryazniteley v pochve [Experimental studies of laser fluorescence method for remote control of plant stress situation induced by soil pollution]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2013, no. 5. DOI: [10.7463/0513.0565060](https://doi.org/10.7463/0513.0565060)
7. Voskresenskaya O.L., Grosheva N.P., Skochilova E.A. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology]. Yoshkar-Ola, MarSTU, 2008. 148 p.
8. *Chlorophyll*. Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Chlorophyll> , accessed 01.12.2013.
9. *Izuchenie spektrov fluorestsentsii i kinetiki induksii fluorestsentsii foto-sinteziruyushchikh organizmov* [Study of fluorescence spectra and fluorescence induction kinetics of photo-synthesizing organisms]. MSU. Faculty of Biology. Department of Biophysics: website. Available at: <http://www.biophys.msu.ru/material/mprac/3.pdf> , accessed 01.09.2013.
10. 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.
11. Kancheva R., Borisova D. Vegetation Stress Indicators Derived From Multispectral And Multitemporal Data. *Space Technol.*, 2007, vol. 26, no. 3, pp. 1-8.
12. Buschmann C. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves. *Photosynth. Res.*, 2007, vol. 92, pp. 261-271.
13. Gouveia-Neto A.S., Silva Jr. E.A., Costa E.B., Bueno L.A., Silva L.M.N., 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
14. Kancheva R., Borisova D., Iliev I. Chlorophyll fluorescence as a plant stress indicator. *Proceedings of the Fifth National Conference*, Space Research Institute – Russian Academy of Sciences. Moscow: Azbuka-2000 Ltd., 2008, vol. 5, pp. 301-306.
15. Krezhova D. Spectral Remote Sensing of the Responses of Soybean Plants to Environmental Stresses. In: Krezhova D., ed. *Soybean - Genetics and Novel Techniques for Yield Enhancement*. InTech Publ., 2011, vol. 5, pp. 215-265.
16. Wen Li Chen, YuHua Bi, Qiang Li, Quan Zhou, Da Xing. Changes of Delayed Luminescence and CLSM Imaging of Chlorophyll Autofluorescence during Petal Development in Gerbera hybrid. *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6441, pp. 64411X-1 - 64411X-7. DOI: 10.1117/12.717026

17. Agati G., Biagi C., Mazzinghi P. Detection of the in vivo chlorophyll fluorescence spectrum: effects of environmental factors and laser excitation parameters. *Proc. of SPIE*, 1997, vol. 3107, pp. 33-39. DOI: 10.1117/12.274733
18. Cecchi G., Bazzani M., Pantani L. Fluorescence lidar remote sensing of vegetation. *Proc. of SPIE*, 1995, vol. 2585, pp. 48-56. DOI: [10.1117/12.227168](https://doi.org/10.1117/12.227168)
19. Hoge F.E., Swift R. N., Yungel J. K. Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plants. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 19, pp. 2991-3000.
20. Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti* [Applied statistics: Classification and reduction of dimension]. Moscow, Finansy i statistika, 1989. 607 p.