

УДК 504.064.36

## ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ

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

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

e-mail: belov@bmstu.ru; ekomonit@bmstu.ru; fed@bmstu.ru; gorod@bmstu.ru

*Исследован лазерный флуоресцентный метод контроля состояния растений. Приведены результаты экспериментальных исследований спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в различных стрессовых состояниях, вызванных наличием в почве загрязнителей, избыточной воды, механическим повреждением растений. Показано, что при длине волны возбуждения флуоресценции 532 нм воздействие различных стрессовых факторов может проявляться в зависимости от вида стресса и вида растения как в увеличении интенсивности лазерно-индуцированной флуоресценции, так и 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 интенсивности и формы спектра лазерно-индуцированной флуоресценции растений может быть положено в основу лазерного метода обнаружения стрессовых состояний растений.*

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

## LASER METHOD FOR VEGETATION MONITORING

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

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: belov@bmstu.ru; ekomonit@bmstu.ru; fed@bmstu.ru; gorod@bmstu.ru

*Laser fluorescence method for vegetation monitoring is investigated. Experimental studies results of laser-induced fluorescence spectra of plants in different stress situations caused by presence of soil pollutant, water-logged soil or mechanical damage are provided. It is proved that at the fluorescence excitation wavelength 532 nm impact of different stress factors for various stress situations and various vegetation types may cause both increasing of the laser-induced fluorescence intensity, and changing of fluorescence spectrum form. Fluorescence intensities ratio at wavelengths 680 and 740 nm can be regarded as identifying factor characterizes the changing form of laser-induced fluorescence spectrum. Measurement of the intensity and form of the spectrum of laser-induced fluorescence of plants can be the basis of laser method for detection the plant stress situations.*

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

Методы, основанные на анализе спектров лазерно-индуцированной флуоресценции, широко используются в науке и технике. Создание мощных импульсных лазеров позволило распространить методы флуоресцентного анализа на область дистанционного зондирования. Одной

из перспективных областей использования лазерного флуоресцентного анализа может стать контроль состояния растительности [1–16].

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.

Такие 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.

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 важным информационным признаком флуоресценции растительности является форма спектров 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 разными авторами, на различной 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 для создания бортовой аппаратуры лазерным источником 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).

Заметим также, что хотя для излучения на длине 532 нм поглощение хлорофилла в растворах и изолированных хлоропластах мало, это излучение эффективно поглощается в листьях растений из-за сложной структуры листа (благодаря которой оптические пути света значительно увеличены по сравнению с геометрической толщиной листа) [17].

В работе [18] показано, что зеленый свет, несмотря на низкие коэффициенты удельного поглощения хлорофилла в этой спектральной области, эффективно поглощается в ткани листа (порядка 80 % поглощения в красной или синей спектральной области).

Поэтому не удивительно, что число работ, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований спектров флуоресценции здоровой растительности при длине возбуждения 532 нм, довольно велико [5–9, 12, 19–22]).

Однако число работ, посвященных экспериментальным исследованиям спектров флуоресценции растений в стрессовых состояниях при длине возбуждения 532 нм, мало [10, 12, 16, 23] (и работы этих же авторов на основе того же экспериментального материала в других изданиях).

Настоящая статья посвящена исследованию лазерного метода контроля стрессовых состояний растений для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм. Такая задача представляет практический интерес для мониторинга состояния растений (например, сельскохозяйственных культур) по результатам дистанционных измерений.

**Эксперимент.** Для измерений спектров лазерно-индуцированной флуоресценции была создана лабораторная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

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 выполнены измерения спектров флуоресценции растений в диапазоне 595... 800 нм. Одновременно со спектром флуоресценции регистрировалась интенсивность отраженного лазерного излучения на длине волны 532 нм.

Основные параметры лабораторной установки и лазерного источника приведены ниже.

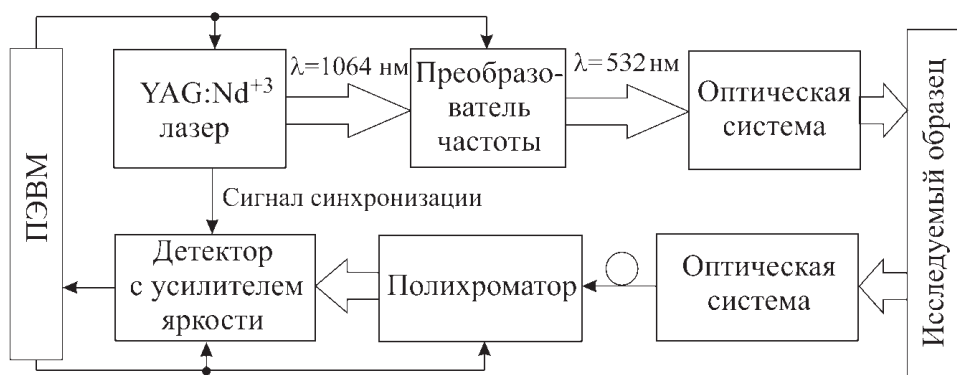


Рис. 1. Структурная схема лабораторной установки

### *Основные параметры лабораторной установки*

Диапазон регистрации спектра, нм .....	595–800
Диаметр приемного объектива, мм .....	15
Расстояние до растений, м .....	~ 1

### **Основные параметры лазера**

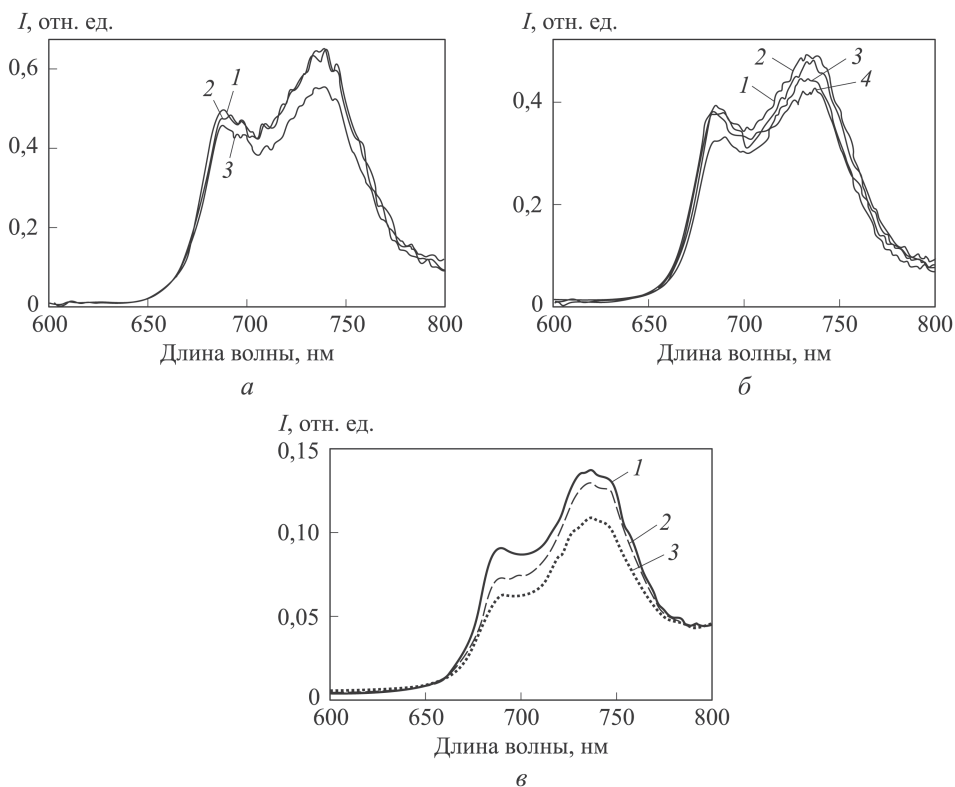
Энергия импульса лазера, мДж .....	2,1
Длительность импульса, нс .....	< 7
Длина волны, нм .....	532
Частота повторения, Гц .....	До 500
Модовый состав .....	TEM00
Расходимость луча, мрад .....	< 3
Диаметр луча, мм .....	0,8
Стабильность энергии в импульсе, СКО, .....	< 1
Охлаждение .....	Воздушное
Габаритные размеры, мм:	
блока излучателя .....	164 × 274 × 93
блока питания .....	340 × 365 × 290
Потребляемая мощность, Вт .....	< 300

Экспериментальное исследование спектров флуоресценции включало в себя в качестве предварительного этапа калибровку полихроматора по длине волны с использованием стандартной методики и калибровочного источника света на основе ртутно-аргоновой лампы с линейчатым спектром; калибровку системы регистрации по чувствительности в диапазоне от 250 до 750 нм по стандартной методике с помощью калиброванного источника света DH2000-CAL. Также регистрировались фоновые шумы детектора на основе усилителя яркости, 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.

Для измерения спектров флуоресценции была выбрана ширина щели полихроматора, равная 200 мкм, которая обеспечивает спектральное разрешение 5 нм. При этом для регистрации интенсивности отраженного лазерного излучения ширина входной щели устанавливалась равной 4 мкм, что позволяло снизить световой поток, поступающий на вход полихроматора и принимать сигнал без насыщения.

Экспериментальные исследования проводились для быстрорастущих и неприхотливых видов растений – различных видов салата, огурцов (как пример сельскохозяйственных культур), травы.

**Обсуждение результатов.** На рис. 2 показаны характерные примеры измеренных спектров флуоресценции растений в нормальном



**Рис. 2. Спектры флуоресценции растений в нормальном состоянии**

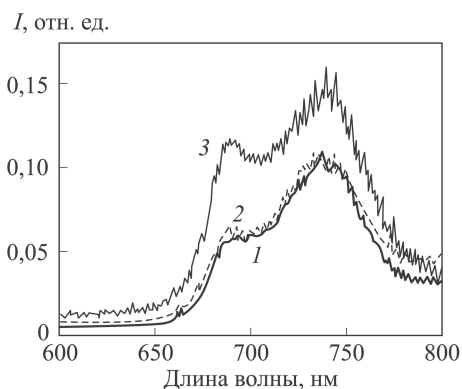
состоянии. Здесь приведены спектры флуоресценции огурца апрельского (рис. 2, а, кривые 1... 3 — спектры при различных измерениях), спектры флуоресценции кресс-салата (рис. 2, б, кривые 1... 4 — спектры при различных измерениях) и травы из газонной смеси Декора Agos (рис. 2, в, кривые 1... 3 — спектры при различных измерениях).

На рис. 2, а... в хорошо видно, что спектр флуоресценции растений в нормальном состоянии имеет два максимума — в области  $\sim 680$  нм (для некоторых растений этот максимум слабо выражен — см. рис. 2, в) и в области  $\sim 740$  нм. При этом для большинства растений в нормальном состоянии отношение  $R_{680/740}$  интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 и 740 нм меньше 0,8 (при длине волны возбуждения флуоресценции в зеленой или сине-зеленой областях спектра) [15].

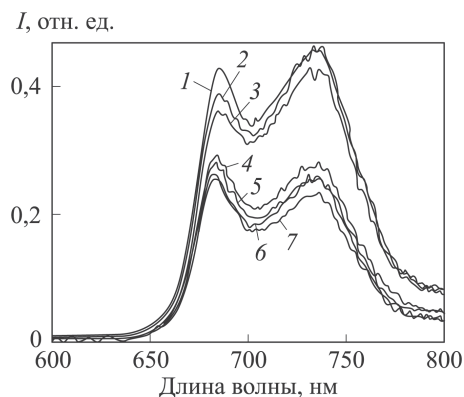
Когда растение находится в стрессовом состоянии его спектр флуоресценции изменяется.

На рис. 3... 5 приведены характерные примеры измеренных спектров флуоресценции для растений в различных стрессовых состояниях.

На рис. 3 приведены спектры лазерно-индуцированной флуоресценции травы (выращенной из газонной смеси Декора Agos) в нормальном (кривые 1, 2) и стрессовом (кривая 3) состояниях, вызван-



**Рис. 3.** Спектры флуоресценции травы в стрессовом состоянии, вызванном внесением в почву медного купороса



**Рис. 4.** Спектры флуоресценции кресс-салата в стрессовом состоянии, вызванном механическим повреждением растения

ных внесением в почву медного купороса  $\text{CuSO}_4$  (5 г, разбавленные в 200 мл воды, на 3 горшка с травой размерами  $9 \times 9 \times 10$  см).

Кривая 1 соответствует измерению спектра лазерно-индуцированной флуоресценции через месяц после первых всходов травы, а кривая 2 — еще через две недели непосредственно перед внесением в почву загрязнителя. Кривая 3 соответствуют спектру флуоресценции травы в стрессовом состоянии, измеренному через две недели после внесения в почву медного купороса.

Из рис. 3 следует, что влияние стрессового фактора (в данном случае вызванного внесением в почву медного купороса) может проявляться в изменении уровня флуоресценции. При этом форма спектра флуоресценции меняется мало.

Этот эффект понятен, так как первая фаза стресса растений — первичная индуктивная стрессовая реакция [24]. 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.

Рис. 4 иллюстрирует другой характер изменения спектров флуоресценции растений в стрессовом состоянии. На рис. 4 приведены спектры лазерно-индуцированной флуоресценции кресс-салата в нормальном (кривые 1... 3) и стрессовом (кривые 4... 7) состояниях, вызванных механическим повреждением растения — примятием салата. Разные кривые соответствуют разным измерениям по времени (до механического повреждения и в интервале времени от 20 до 40 мин после механического повреждения).

На рис. 4 хорошо видно, что влияние стрессового фактора (в данном случае вызванного механическим повреждением) может проявляться в изменении формы спектра флуоресценции. Отношение  $R_{680/740}$  интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 и 740 нм для растения в стрессовом состоянии больше единицы, а значение  $R_{680/740}$  для растения в нормальном состоянии меньше единицы. При этом уровень флуоресценции для растения в стрессовом состоянии даже несколько меньше уровня флуоресценции для растения в нормальном состоянии.

Эффект изменения формы спектра флуоресценции для растений в стрессовом состоянии специалисты по физиологии растений связывают с колебаниями активности фотосистемы II, которые приводят к изменениям отношения интенсивностей флуоресценции в красной (680 нм) и дальней красной (740 нм) областях [25].

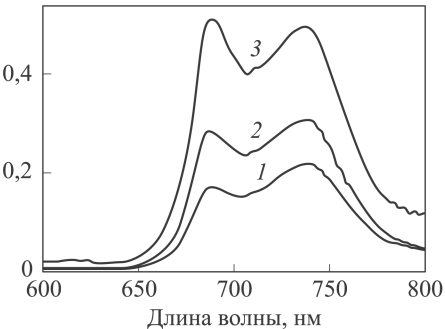
Рис. 5 иллюстрирует еще один возможный вид изменения спектра флуоресценции растения в стрессовом состоянии.

На рис. 5 приведены спектры лазерно-индуцированной флуоресценции кресс-салата в нормальном (кривая 1) и стрессовом (кривая 3) состояниях, вызванных избыточным количеством воды при поливе растения. Кривая 3 соответствует усредненному (по разным образцам) спектру флуоресценции при избыточном поливе в течение 24 дней. Кривая 2 показывает промежуточное изменение спектра (между точно нормальным и точно стрессовым) и соответствует усредненному (по разным образцам) спектру флуоресценции при избыточном поливе в течение 17 дней.

Из рис. 5 следует, что влияние стрессового фактора (в данном случае вызванного избыточным количеством воды при поливе) постепенно накапливается при увеличении времени неправильного полива растения и может проявляться одновременно как в изменении формы спектра и в увеличении уровня флуоресценции. На рисунке измеренные уровни флуоресценции для растений в стрессовом состоянии (кривая 3) существенно выше уровня флуоресценции для растений в нормальном состоянии. При этом отношение  $R_{680/740}$  интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 и 740 нм для растения в стрессовом состоянии больше единицы, а значение  $R_{680/740}$  для растения в нормальном состоянии меньше единицы.

Проведенные экспериментальные исследования показывают перспективность лазерного флуоресцентного метода контроля состояния

$I$ , отн. ед.



**Рис. 5. Спектры флуоресценции кресс-салата в стрессовом состоянии, вызванном избыточным количеством воды при поливе**



растений для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм. Такой контроль может быть реализован с использованием беспилотного летательного аппарата и бортового лазерного флуориметра. Объективная информация, которую может дистанционно получить бортовой лазерный флуориметр, — это форма спектра флуоресценции и относительная интенсивность флуоресценции исследуемого участка (например, посадок сельскохозяйственных культур). Поскольку флуоресценция почво-грунтов много меньше флуоресценции растительности (это показывают данные, экспериментально полученные как авторами настоящей работы, так другими авторами), то измеренная форма спектра флуоресценции и интенсивность флуоресценции будут характеризовать именно растительность.

**Выводы.** Таким образом, экспериментальные исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений для длины волны возбуждения 532 нм показывают, что воздействие на растение стрессовых факторов, вызванных наличием в почве загрязнителей, избыточного количества воды или механическим повреждением растений, 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 680 и 740 нм) или (и) в изменении уровня флуоресценции, что может быть положено в основу лазерного метода контроля состояния растений.

## ЛИТЕРАТУРА

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.
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.
3. *Plant abiotic stress diagnostic by laser induced chlorophyll fluorescence spectral analysis of in vivo leaf tissue of biofuel species / A.S. Gouveia-Neto, E.A. da Silva, P.C. Cunha, R.A. Oliveira-Filho, L.M.H. Silva, E.B. da Costa, T.J.R. Camara, L.G. Willadino // Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7568. P. 75680G-1–75680G-8.
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.
5. *Visualization of laser-induced fluorescence of plants influenced by environmental stress with a microfluorescence imaging system and a fluorescence imaging lidar system / Y. Saito, K. Takahashi, E. Nomura, K. Mineuchi, T.D. Kawahara, A. Nomura, S. Kobayashi, H. Ishi // SPIE*. 1997. Vol. 3059. P. 190–198.
6. *Hristov H.A., Borisova E.G., Avramov L.A., Kolev I.N.* Applications of laser-induced fluorescence for remote sensing // *Proceedings of SPIE*. 2001. Vol. 4397. P. 496–500.



7. *Helicopter-based lidar system for monitoring the upper ocean and terrain surface* / K.J. Lee, Y. Park, A. Bunkin, R. Nunes, S. Pershin, K. Voliak // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41. No. 3. P. 401–406.
8. *Fluorescence sensing systems: In vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply* / L.A. Corp, J.E. McMurtrey, E.M. Middleton, C.L. Mulchi, E.W. Chappelle, C.S.T. Daughtry // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. P. 470–479.
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.
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.
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.
13. *Water deficit and salt stress diagnosis through LED induced chlorophyll fluorescence analysis in Jatropha curcas L. oil plants for biodiesel* / A.S. Gouveia-Neto, E.A. Silva, R.A. Oliveira, P.C. Cunha, E.B. Costa, T.J.R. Camara, L.G. Willadino // *Proc. of SPIE*. 2011. Vol. 7902. P. 79020A-1–79020A-10.
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. P. 29–35.
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. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/506199.html> (дата обращения 05.03.2014).
16. *Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes* / E. Middleton, J.E. McMurtrey, P.K. Entcheva Campbell, L.A. Corp, L.M. Butchera, E.W. Chappelle // *Proc. of SPIE*. 2003. Vol. 4879. P. 72–83.
17. *Мерзляк М.Н.* Пигменты, оптика листа и состояние растений // *Соросовский образовательный журнал*. 1998. № 4. С. 19–24.
18. *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.
19. *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.
20. *Performance Check of Vegetation Fluorescence Imaging Lidar through In Vivo and Remote Estimation of Chlorophyll Concentration Inside Plant Leaves* / Y. Saito, R. Saito, E. Nomura, T.D. Kawahara, A. Nomur, S. Takaragaki, K. Ida, S. Takeda // *Optical Review*. 1999. Vol. 6. No. 2. P. 155–159.
21. *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.
22. *Бункин Ф.В., Бункин А.Ф.* Лидарное зондирование водоемов, почвы и растительности // *Оптика атмосферы и океана*. 2000. Т. 13. № 1. С. 63–68.
23. *Laser remote monitoring of the plant photosynthetic activity* / R. Barbini, F. Colao, R. Fantom, F. Palucci, S. Ribezzo // *SPIE*. 1995. Vol. 2585. P. 57–65.
24. *Яковец О.Г.* Фитофизиология стресса. Минск: БГУ, 2010. 103 с.

## 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. *Appl. Spectrosc.*, 2010, vol. 64, no. 1, pp. 30–36. DOI: dx.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. *Appl. Spectrosc.*, 2011, vol. 65, no. 1, pp. 10–19. DOI: dx.doi.org/10.1366/10-06100
- [3] 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. DOI: 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
- [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
- [6] Hristov H.A., Borisova E.G., Avramov L.A., Kolev I.N. Applications of laser-induced fluorescence for remote sensing. *Proc. of SPIE, 11th Int. School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, 2001, vol. 4397, pp. 496–500. DOI: 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. *Appl. Opt.*, 2002, vol. 41, no. 3, pp. 401–406. DOI: 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, pp. 470–479. DOI: 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
- [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
- [11] Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Fluorescence of poplar leaves, growing near the road. *Opt. Atmos. Okeana [Atmos. Ocean Opt.]*, 2011, vol. 24, no. 5, pp. 437–440 (in Russ.).
- [12] Belasque J., Gasparoto M.C.G., Marcassa L.G. Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy. *Appl. Opt.*, 2008, vol. 47, no. 11, pp. 1922–1926. DOI: dx.doi.org/10.1364/AO.47.001922
- [13] 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

- [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. *J. of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2008, vol. 9, pp. 29–35. DOI: 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. *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd. "Nauka i obrazovanie" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education" of Bauman MSTU], 2012, no. 12 (in Russ.). DOI: 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, pp. 72–83. DOI:10.1117/12.463087
- [17] Merzlyak M.N. Pigments, leaf optics and plant state. *Soros. Obr. Zhur. (SOZh)* [Soros Ed. J.], 1998, no. 4, pp. 19–24 (in Russ.).
- [18] 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. *J. Plant Physiol. (JPP)*, 2011, vol. 168, no. 14, pp. 1641–1648. DOI: 10.1016/j.jplph.2011.03.016
- [19] Grishaev M.V., Sal'nikova N.S. A setup for remote recording of the spectrum of laser-induced fluorescence from crowns of woody plants. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instr. and Experim. Techn., vol. 53, no. 5, pp. 746–749], 2010, no. 5, pp. 133–136 (in Russ.). DOI: 10.1134/S0020441210050246
- [20] 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. DOI: 10.1007/s10043-999-0155-8
- [21] Afonassenko A.V., Iglakova A.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Prokop'ev V.E. Laboratory and lidar measurements of birch leaves spectral characteristics in different periods of vegetation. *Opt. Atmos. Okeana* [Atmos. Ocean Opt.], 2012, vol. 25, no. 3, pp. 237–243 (in Russ.).
- [22] Bunkin F.V., Bunkin A.F. Lidar sensing of water, ground, and plant surfaces. *Opt. Atmos. Okeana* [Atmos. Ocean Opt.], 2000, vol. 13, no. 1, pp. 63–68 (in Russ.).
- [23] 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
- [24] Yakovets O.G. Fitofiziologiya stressa [Phytophysiology of stress]. Minsk, BGU Publ., 2010, 103 p.
- [25] Lysenkov V.S., Varduni T.V., Soyer V.G., Krasnov V.P. Plant chlorophyll fluorescence as an environmental stress characteristic: a theoretical basis of the method application. *Fundam. Iss.* [Fundam. Res.], 2013, no. 4 (1), pp. 112–119 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.03.2014

Белов Михаил Леонидович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Belov M.L. — Dr. Sci. (Eng.), head researcher of "Radioelectronics and Laser Technology" Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optic of atmosphere.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Булю Ольга Алексеевна — аспирантка кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области лазерной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Bullo O.A. — post-graduate of “Laser and Optic and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of laser technology.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Федотов Юрий Викторович — канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области лазерной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Fedotov Yu.V. — Dr. Sci. (Eng.), researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of laser technology.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Городничев Виктор Александрович — д-р техн. наук, начальник отдела НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Gorodnichev V.A. — Dr. Sci. (Eng), head of department of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.