

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №3 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-3.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/29TVN317.pdf>

Статья опубликована 14.05.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Белов М.Л., Черпакова А.А., Альков С.В., Городничев В.А. Выбор информационных каналов для лазерного контроля состояния растений при использовании для возбуждения флуоресценции безопасной длины волны излучения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №3 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/29TVN317.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 004.9+504.06

Белов Михаил Леонидович

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва¹
Профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»
Доктор технических наук
E-mail: belov@bmstu.ru

Черпакова Антонина Андреевна

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва
Магистр кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»
E-mail: ekomonit@bmstu.ru

Альков Сергей Витальевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва
Декан факультета «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кандидат технических наук
E-mail: alkov@bmstu.ru

Городничев Виктор Александрович

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва
Зав. кафедры «Элементы приборных устройств»
Доктор технических наук
E-mail: gorod@bmstu.ru

Выбор информационных каналов для лазерного контроля состояния растений при использовании для возбуждения флуоресценции безопасной длины волны излучения

Аннотация. Статья посвящена определению наиболее перспективных информационных спектральных каналов для дистанционного (неконтактного) лазерного метода флуоресцентного контроля состояния растительности при использовании для возбуждения лазерно-индуцированной флуоресценции растений безопасной для зрения длины волны излучения 0,355 мкм в длинноволновом ультрафиолетовом спектральном диапазоне. Создана база данных экспериментальных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции разных видов листовых растений в нормальном и стрессовом состояниях. Анализ спектров флуоресценции из созданной базы данных показывает, что для большинства растений регистрация лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах в

¹ 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

видимой области спектра с центральными длинами волн 0,44 и 0,69 мкм или 0,69 и 0,74 мкм позволяет решить задачу обнаружения стрессового состояния растений. Однако, для каждого вида растений необходимо подбирать (на основе предварительно полученных экспериментальных данных) свое пороговое значение идентифицирующего параметра. Более перспективным для задачи лазерного дистанционного (неконтактного) флуоресцентного контроля состояния растений при длине волны возбуждения флуоресценции 0,355 мкм в длинноволновом ультрафиолетовом спектральном диапазоне представляется переход к регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения в трех и более узких спектральных диапазонах в видимой области спектра.

Ключевые слова: база данных спектров флуоресценции; анализ спектров лазерно-индуцированной флуоресценций растений; безопасная для зрения длина волны; контроль состояния растений

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей является разработка методов и аппаратных средств для неконтактного или дистанционного обнаружения стрессовых состояний растений (см., например, [1-7]).

Число работ, посвященных разработке дистанционных или неконтактных флуоресцентных методов обнаружения стрессовых состояний растительности, довольно велико (см., например, [1-15] и ссылки в этих работах). В этих работах приводится описание измерительной аппаратуры и экспериментально измеренные спектры лазерно-индуцированной флуоресценции разных видов растений.

Однако, многие вопросы, связанные с разработкой методов и аппаратных средств мониторинга состояния растительности, остаются неясными.

К настоящему времени в работах по лазерному флуоресцентному мониторингу состояния растений экспериментально измеренные спектры лазерно-индуцированной флуоресценции были получены при использовании разных аппаратных средств и разных длин волн возбуждения флуоресценции в широком спектральном диапазоне от 0,266 до 0,63 мкм. Поэтому важной задачей является определение наиболее перспективных (для обнаружения стрессовых состояний растительности) длин волн возбуждения флуоресценции и спектральных диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения.

Постановка задачи

Использование лазерной аппаратуры для задач неконтактного или дистанционного контроля связано с опасностью для органов зрения человека.

Наиболее вредное воздействие излучение лазера оказывает на сетчатку глаза человека. Спектральный диапазон длин волн лазерного излучения, оказывающего вредное воздействия на сетчатку глаза, составляет от 0,38 до 1,4 мкм. Излучение лазеров с длинами волн свыше 1,4 мкм или менее 0,38 мкм воздействует на передние среды глаза человека и является менее опасным, чем излучение лазеров с длинами волн 0,38 - 1,4 мкм (см., например, ГОСТ 31581-2012 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий).

Для задачи обнаружения стрессовых состояний растительности спектральный диапазон свыше 1,4 мкм не подходит и единственным вариантом (при требовании использовать безопасное для зрения лазерное излучение) является спектральный диапазон менее 0,38 мкм.

В пределах спектрального диапазона с длинами волн менее 0,38 мкм наибольший интерес представляют длины волн не сильно отличающиеся (в сторону меньших длин волн) от 0,38 мкм (при уменьшении длины волны от 0,38 мкм возрастает поглощение озоном). Поэтому перспективными источниками лазерного излучения для возбуждения флуоресценции являются третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима, с длиной волны излучения 0,355 мкм и азотный лазер с длиной волны излучения 0,337 мкм.

При разработке бортовой аппаратуры для дистанционного зондирования с точки зрения чисто технических параметров твердотельный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с длиной волны 0,355 мкм имеет преимущество перед газовым лазером (на молекулярном азоте) с длины волны 0,337 мкм. Кроме того, длина волны возбуждения 0,355 мкм характеризуется несколько большей эффективностью возбуждения флуоресценции, чем длина волны 0,337 мкм [8].

Исследование спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений при длине волны возбуждения 0,355 мкм проводилось в ряде работ [1,8-15]. Однако, в настоящее время нет ясности какие спектральные диапазоны регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения являются наиболее перспективными для задачи обнаружения стрессовых состояний растительности при возбуждении флуоресценции в ультрафиолетовом спектральном диапазоне на безопасной для зрения длине волны 0,355 мкм.

Данная статья посвящена определению наиболее перспективных информационных спектральных каналов регистрации для лазерного метода контроля состояния растительности при использовании для возбуждения флуоресценции безопасной для зрения длины волны 0,355 мкм.

Такая задача представляет интерес для мониторинга состояния растительности по результатам дистанционных измерений с авиационного носителя.

Анализ спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений при безопасной для зрения длине волны возбуждения 0,355 мкм

Для разработки лазерного флуоресцентного метода обнаружения стрессовых состояний растений при возбуждении флуоресценции на безопасной для зрения длине волны возбуждения 0,355 мкм была сформирована база данных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции.

В базе данных записаны экспериментально измеренные спектры флуоресценции листьев пшеницы, табака, кукурузы, свеклы, гороха, фасоли, винограда, шпината, магнолии, рододендрона, элеокарпуса, фирмианы, листьев деревьев и кустарников (калины, лайма, апельсина, османтуса, бука, ивы, падуба, различных видов вишни) и др. для длины волны возбуждения 0,355 мкм [1,8-15].

Примеры спектров лазерно-индуцированной флуоресценции здоровых растений и растений в различных стрессовых состояниях для длины волны возбуждения 0,355 мкм показаны на рисунках 1-4 (интенсивность флуоресценции на рисунках дана в относительных единицах).

На рисунках 1, 2 приведены характерные спектры лазерно-индуцированной флуоресценции здоровой растительности. На рисунке 1 [15] - лист лайма, на рисунке 2 [1] - кривые а, b, d - различные сорта вишни, с - ива вавилонская плакучая, е - падуб пурпурный, f - магнолия голая.

Из рисунков 1 и 2 видно, что спектры лазерно-индуцированной флуоресценции здоровой растительности имеют максимумы в красной (~0,68...0,69 мкм) и в дальней красной (~0,73...0,74 мкм) спектральных областях. Причем, для большинства здоровых растений

отношение R интенсивностей флуоресценции на длинах волн 0,68...0,69 мкм к интенсивности флуоресценции на длинах волн 0,73...0,74 мкм меньше 1.

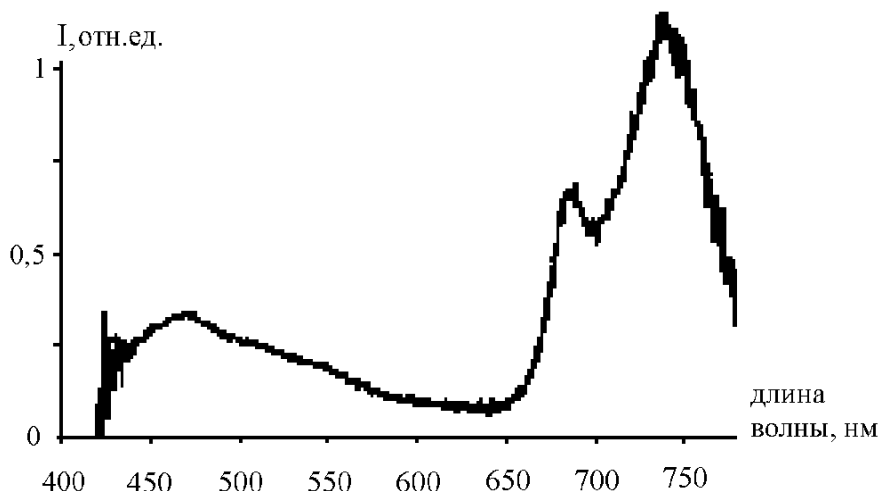


Рисунок 1. Спектры флуоресценции листьев лайма

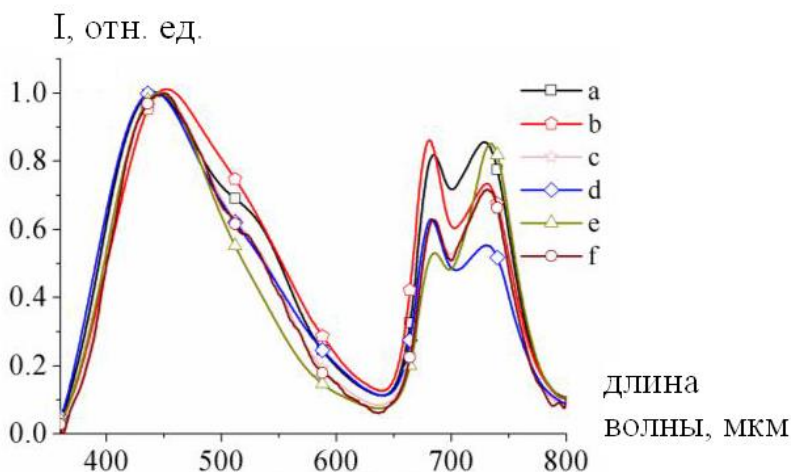


Рисунок 2. Спектры флуоресценции вишни, ивы, падуба и магнолии

На рисунке 3 приведены спектры флуоресценции листьев бука - зеленые (рисунок 3а) и желтые (рисунок 3б) [15].

На рисунке 4 приведены спектры флуоресценции пшеницы как в нормальном состоянии, так и в стрессовом состоянии. Стресс вызван внесением в почву кадмия [11] (кривая 1 - растение в нормальном состоянии, кривая 2 - в стрессовом состоянии).

Из рисунков 3 и 4 видно, что для спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в стрессовых состояниях (или с желтыми листьями) отношение R (интенсивности флуоресценции на длинах волн 0,68...0,69 мкм к интенсивности флуоресценции на длинах волн 0,73...0,74 мкм) увеличивается.

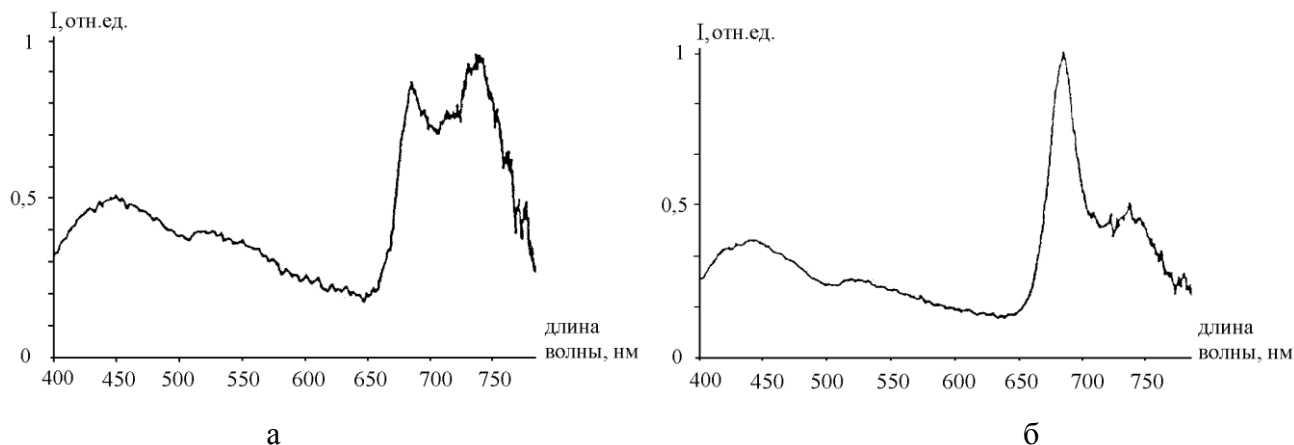


Рисунок 3. Спектры флуоресценции листьев бука

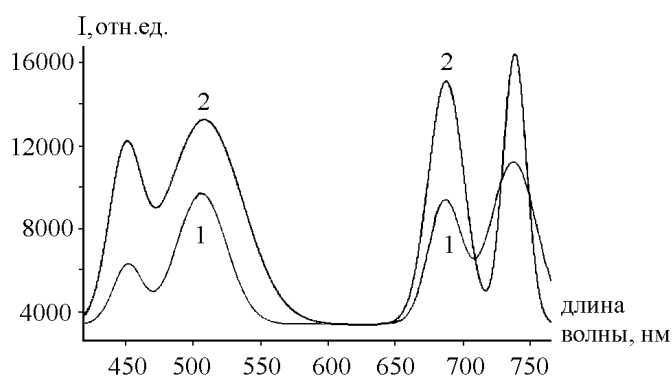


Рисунок 4. Спектры флуоресценции листьев пшеницы

Различие спектров лазерно-индуцированной флуоресценции здоровой растительности и растительности в стрессовых состояниях является физической основой обнаружения стрессовых состояний растений путем регистрации спектра лазерно-индуцированной флуоресценции.

Информационные спектральные диапазоны регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения растений при безопасной для зрения длине волны возбуждения 0,355 мкм

Лазерный флуориметр, регистрирующий спектр флуоресценции в широком спектральном диапазоне, хорошо подходит для лабораторных исследований. Для дистанционного зондирования растительности (например, с авиационного носителя) более подходящим является флуориметр, регистрирующий лазерно-индуцированное флуоресцентное излучение в нескольких (как минимум в двух) узких спектральных диапазонах (шириной ~5-20 нм) и обрабатывающий данные измерений (например, для построения карты состояния растительного покрова) в масштабе времени близком к реальному.

Сравнительный анализ информационных спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения проводился с использованием экспериментальных спектров флуоресценции в диапазоне длин волн 0,4...0,8 мкм, для длины волны возбуждения флуоресценции 0,355 мкм. При этом, из базы данных были взяты только те растения, для которых имеются экспериментальные спектры флуоресценции как для нормального, так и для стрессового состояния растения.

Результаты обработки экспериментальных данных для двух наиболее перспективных вариантов спектральных диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения растений показаны на рисунках 5 и 6. Здесь представлены результаты расчетов (по экспериментальным спектрам флуоресценции) идентифицирующего параметра $R_{\lambda_1;\lambda_2}$, равного отношению интенсивностей флуоресценции в двух узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн λ_1 и λ_2 :

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

где $I(\lambda)$ - интенсивность флуоресценции, регистрируемой приемником в спектральном диапазоне с центральной длиной волны λ .

За критерий, характеризующий перспективность спектральных диапазонов (в задаче обнаружения стрессовых состояний растений), было взято значение разности параметра $R_{\lambda_1;\lambda_2}$ для стрессового и нормального состояния растений. Чем больше эта разность, тем больше надежность обнаружения стрессовых состояний растений в условиях погрешностей реальных измерений.

Для рисунка 5: $\lambda_1 = 0,44$ мкм и $\lambda_2 = 0,69$ мкм. Для рисунка 6: $\lambda_1 = 0,69$ мкм и $\lambda_2 = 0,74$ мкм.

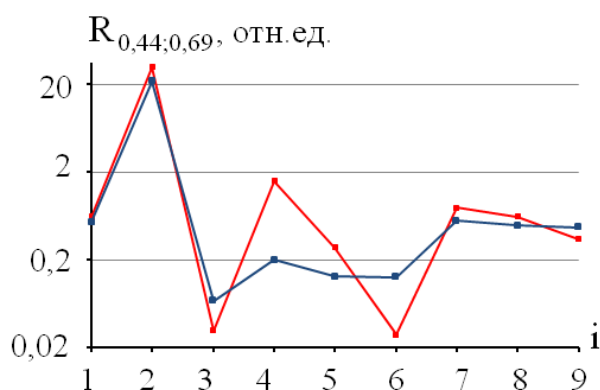


Рисунок 5. Параметр $R_{0,44;0,69}$ для растений в нормальном и стрессовом состоянии

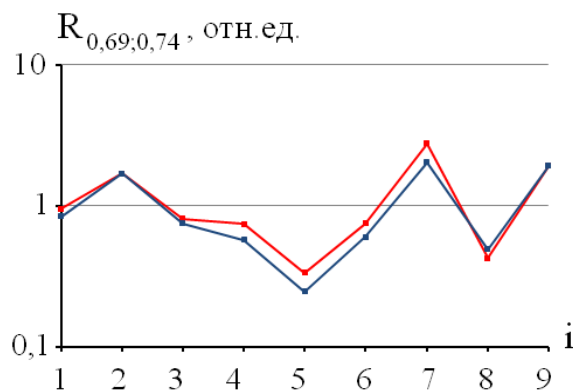


Рисунок 6. Параметр $R_{0,69;0,74}$ для растений в нормальном и стрессовом состоянии

Красные маркеры на рисунках соответствуют идентифицирующему параметру $R_{\lambda_1;\lambda_2}$ для стрессового состояния растения, синие маркеры - для нормального состояния растения. На рисунках 5 и 6 по вертикальной оси - логарифмический масштаб. По горизонтальной оси отложен номер i - номер растения в базе данных (см. таблицу 1).

Таблица 1

Растения, для которых на рисунках 5 и 6 представлены результаты обработки спектров

| i , номер растения | Название растения | Причина стрессового состояния |
|----------------------|-------------------|-------------------------------|
| 1 | пшеница | внесение в почву кадмия |
| 2 | кукуруза | дефицит азота в почве |
| 3 | табак | разрезание растения |
| 4 | рододендрон | инсоляция |
| 5 | фасоль | клещи |
| 6 | табак | внесение пестицидов |
| 7 | горох | внесение в почву кадмия |
| 8 | пшеница | внесение в почву никеля |
| 9 | кукуруза | внесение в почву кадмия |

Анализ результатов обработки данных, представленных на рисунках 5 и 6, показывает, что для большинства растений регистрация флуоресцентного излучения в двух узких спектральных каналах и использование идентифицирующих параметров $R_{0,44;0,69}$ или $R_{0,69;0,74}$ позволяет решить задачу обнаружения стрессового состояния растений. Для большинства растений значение идентифицирующего параметра ($R_{0,44;0,69}$ или $R_{0,69;0,74}$) для растения в стрессовом состоянии превышает значение идентифицирующего параметра для растения в нормальном состоянии.

Однако, из рисунков видно, что для каждого растения надо подбирать (на основе экспериментальных данных) свое пороговое значение идентифицирующего параметра. Причем, для небольшой части растений значение идентифицирующего параметра $R_{0,44;0,69}$ для растения в стрессовом состоянии меньше, чем для растения в нормальном состоянии. Поэтому более перспективным для задачи обнаружения стрессовых состояний растений при длине волны возбуждения флуоресценции 0,355 мкм представляется переход к регистрации излучения в трех и более спектральных диапазонах.

Заключение

Рассмотрена задача определения наиболее перспективных информационных спектральных каналов регистрации для лазерного метода контроля состояния растительности при использовании для возбуждения флуоресценции безопасной для зрения длины волны 0,355 мкм в УФ спектральном диапазоне. Показано, что для большинства растений регистрация лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 0,44 и 0,69 мкм или 0,69 и 0,74 мкм позволяет проводить обнаружение стрессового состояния растений. Однако, для каждого растения надо подбирать (на основе экспериментальных данных) свое пороговое значение идентифицирующего параметра. Более перспективным для задачи контроля состояния растений при длине волны возбуждения флуоресценции 0,355 мкм представляется переход к регистрации излучения в трех и более спектральных диапазонах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang J., Gong W., Shi S., Du L., Sun J., Song S. The effective of different excitation wavelengths on the identification of plant species based on fluorescence lidar / The International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B1. P. 147 - 150.
2. Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Устойчивость результатов лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 1. С. 80-84.
3. Yang J., Gong W., Shi S., Du L., Sun J., Song S. Laser-induced fluorescence characteristics of vegetation by a new excitation wavelength // Spectroscopy letters. 2016. V. 49, N 4. P. 263-267.
4. Афонасенко А.В., Иглакова А.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Прокопьев В.Е. Лабораторные и лидарные измерения спектральных характеристик листьев березы в различные периоды вегетации // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 237-243.
5. Saito K. Plant and Vegetation Monitoring Using Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy // Industrial Applications of Laser Remote Sensing. 2012. P. 99-114.
6. Hedimbi1 M., Singh S., Kent A. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants // Natural Science. 2012. V.4, N 6. P. 395-401.
7. 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 01.09.2016).
8. Chappelle E.W, Corp L.A., McMurtrey J.E., Daughtry C. Fluorescence: a diagnostic tool for the detection of stress in plants // SPIE Proceedings. 1997. Vol. 2959. P. 14-23.
9. Apostol S. Leaf fluorescence as diagnostic tool for monitoring vegetation / Cells to Proteins: Imaging Nature across Dimensions. Netherlands: Springer, 2005. P. 423-430.
10. Saito Y. Laser-induced fluorescence spectroscopy technique as a tool for field monitoring of physiological status of living plants // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6604. P. 66041W-1-66041W-12.
11. Mishra K.B., Gopal R. Study of laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings growing under cadmium stress // Gen. Appl. Plant Physiology. 2005. Vol. 31 (3-4). P. 181 - 196.
12. Snel's M., Guarini R., Dell'Aglio M. First results obtained with a LIDAR Fluorescence sensor system // Proc. of SPIE. 2000. Vol. 4070. P. 100-107.
13. Lichtenthaler H.K., Wenzel O., Buschmann C., Gitelson A. Plant Stress Detection by Reflectance and Fluorescence // Annals New York Academy Of Sciences. 1998. Vol. 851. P. 271-285.
14. Saito Y., Kanoh M., Hatake K., Kawahara T.D., Nomura A. Investigation of laser-induced fluorescence of several natural leaves for application to lidar vegetation monitoring // Applied Optics. 1998. Vol. 37, No 3. P. 431-437.
15. Ender H, Johansson J., Svanberg S., Wallinder E., Bazzani M., Breschi B., Cecchi G., Pantani L., Radicati B., Raimondi V., Tirelli D., Valmory G., Mazzinghi P. Laser-induced fluorescence monitoring of vegetation in Tuscany // EARSeL Advances in remote sensing. 1992. Vol. 1, No 2. P. 119-130.

Belov Mikhail Leonidovich

Bauman state technical university, Russia, Moscow
E-mail: belov@bmstu.ru

Cherpakova Antonina Andreedna

Bauman state technical university, Russia, Moscow
E-mail: ekomonit@bmstu.ru

Alykov Sergey Vitalyevich

Bauman state technical university, Russia, Moscow
E-mail: alkov @bmstu.ru

Gorodnichev Victor Aleksandrovich

Bauman state technical university, Russia, Moscow
E-mail: gorod@bmstu.ru

Search of informative bands for plant condition laser monitoring if using for fluorescence excitation of eye-safe wavelength

Abstract. Search of advanced informative spectral bands for remote (noncontact) laser method of plant condition monitoring is considered for excitation of laser-induced fluorescence of plants in long-wave ultraviolet spectral range at eye-safe wavelength radiation 0,355 μm . Laser-induced fluorescence spectra fluorescence database is created for different types of plants in normal and different stress situations. Analysis of spectra from database indicate that laser-induced fluorescence radiation recording in visual spectral range within two narrow spectral bands with central wavelengths 0,44 and 0,69 μm or 0,69 and 0,74 μm allows solve the problem of detection of plant stress for greater part of plants. However for different samples plants it is necessary to find (based on experimental data) its threshold value of identifiable characteristics. Laser-induced fluorescence radiation recording in visual spectral range within three and more spectral bands is more promising method for plant condition remote (noncontact) laser monitoring at wavelength of fluorescence excitation 0,355 μm in long-wave ultraviolet spectral range.

Keywords: fluorescence spectra database; analysis of plant laser-induced fluorescence spectra; eye-safe wavelength; detection of plant stress