

Радиооптика

Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2017. № 03. С. 29–42.

DOI: **10.24108/rdopt.0317.0000107**

Представлена в редакцию: 09.05.2017

Исправлена: 23.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 004.9+504.06

Оптимизация спектральных информационных каналов для флуоресцентного контроля состояния растений

Белов М.Л.^{1,*}, Черпакова А.А.¹,
Городничев В.А.¹, Альков С.В.¹

*belov@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

На основе экспериментально измеренных спектров флуоресценции проведено математическое моделирование и определение оптимальных спектральных информационных каналов регистрации для лазерного флуоресцентного метода обнаружения участков растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях. Показано, что для длины волны возбуждения флуоресценции 0,355 мкм высокая надежность обнаружения может быть обеспечена при использовании спектральных информационных каналов как с центральными длинами волн 0,69 и 0,74 мкм, так и с центральными длинами волн 0,44 и 0,69 мкм. При этом, использование спектральных информационных каналов с центральными длинами волн 0,44 и 0,69 мкм позволяет обеспечить для большинства растений более высокие вероятности правильного обнаружения и более низкие вероятности ложных тревог. Представляется перспективным проводить мониторинг состояния растительности при использовании трех спектральных информационных каналов с центральными длинами волн 0,44; 0,69 мкм и 0,74 мкм для получения высоких вероятностей правильного обнаружения и низких вероятности ложных тревог для всех растений.

Ключевые слова: спектральные информационные каналы, лазерно-индуцированная флуоресценция, база данных спектров флуоресценции, контроль состояния растений

Введение

В настоящее время в связи с климатическими изменениями и нестабильностью погодных условий актуальным является вопрос о возможности получения целостной глобальной и региональной информации о состоянии биологических систем и прогноза урожая сельскохозяйственных культур. Поэтому возникает естественный интерес к системам мониторинга состояния растительности.

Неблагоприятные факторы (низкая или высокая температура, избыток или недостаток воды, засоление почвы, болезни и т.п.) приводят к невозможности нормального развития растений. Такие состояния растительности трудно распознать по внешнему виду рас-

тений, особенно на ранних стадиях, поэтому актуальна разработка методов, аппаратных средств и их информационного обеспечения для контроля состояния растений.

Одним из перспективных направлений мониторинга состояния растительности является дистанционный контроль состояния растительности на основе регистрации лазерно-индуцированной флуоресценции растений (см., например, [1-9]).

Интерес к флуоресцентному методу связан с тем, что флуоресценция хлорофилла является пока единственным показателем, который позволяет исследовать в живых объектах (*in vivo*) протекание фотохимических реакций, связанных с работой фотосистемы 2 высших растений – системы, наиболее чувствительной к факторам внешней среды (см., например, [10]).

Физической основой большинства флуоресцентных методов является различие спектров флуоресценции растений находящихся в нормальном состоянии и в условиях неблагоприятных для развития.

На сегодняшний день разработаны различные варианты аппаратуры для лазерного мониторинга состояния растительности (см., например, [1-9]). Однако, многие важные для практики вопросы, связанные с оптимизацией информационных каналов регистрации и длины волны возбуждения флуоресценции, остаются неясными.

1. Постановка задачи

На сегодняшний день получен достаточно большой объем экспериментальных данных по спектрам флуоресценции различных видов растительности в нормальном состоянии и растительности в разных неблагоприятных для развития условиях при длинах волн возбуждения лазерно-индуцированной флуоресценции от 266 до 635 нм. Однако, при дистанционном лазерном зондировании всегда возникает вопрос о безопасности используемого лазерного излучения для зрения человека.

Вредное воздействие лазерное излучение оказывает прежде всего на сетчатку глаза человека. В спектральной области лазерных длин волн от 0,38 до 1,4 мкм лазерное излучение оказывает наиболее вредное действия на сетчатку глаза человека. В спектральной области более 1,4 мкм или менее 0,38 мкм лазерное излучение воздействует в основном на передние среды глаза человека и является менее опасным [11].

Спектральная область более 1,4 мкм не подходит для флуоресцентного лазерного мониторинга состояния растительности. Поэтому единственным вариантом для длины волны возбуждения флуоресценции (с точки зрения безопасности для зрения) является спектральная область с длинами волн менее 0,38 мкм.

В спектральной области менее 0,38 мкм наиболее перспективными лазерными излучателями (с точки зрения требований к аппаратуре дистанционного флуоресцентного лазерного зондирования – короткие импульсы с большой энергией) являются третья гармоника ИАГ лазера с длиной волны 0,355 мкм и лазер на молекулярном азоте с длиной волны излучения 0,337 мкм. При этом, для бортовой аппаратуры дистанционного зондирова-

ния твердотельный ИАГ лазер имеет, конечно, преимущество перед газовым азотным лазером.

Измерение спектров флуоресценции растений для лазерной волны возбуждения 0,355 мкм проводилось в работах [3,12-23]. Однако, на сегодняшний день не ясно какие информационных каналов регистрации флуоресцентного излучения являются наиболее перспективными для лазерной волны возбуждения 0,355 мкм.

В статье на основе экспериментально измеренных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции различных видов растений проводится математическое моделирование и определение оптимальных информационных каналов регистрации на основе полученных вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог для задачи обнаружения участков растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях (с аномальными спектрами лазерно-индуцированной флуоресценции, не соответствующими спектрам флуоресценции растительности в нормальном состоянии).

2. Математическое моделирование вероятности правильного обнаружения и вероятности ложных тревог для задачи обнаружения растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях

Математическое моделирование вероятности правильного обнаружения и вероятности ложных тревог для задачи обнаружения растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях (с аномальными спектрами лазерно-индуцированной флуоресценции, не соответствующими спектрам флуоресценции растительности в нормальном состоянии) проводилось на основе экспериментально полученных спектров отражения различных видов растений для лазерной длины волны возбуждения 0,355 мкм.

Для проведения математического моделирования был сформирован банк данных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции для лазерной длины волны возбуждения 0,355 мкм.

В банк данных записаны экспериментально измеренные спектры флуоресценции листьев пшеницы, гороха, кукурузы, табака, свеклы, фасоли, винограда, шпината и др., листьев различных деревьев и кустарников (различных видов вишни, бука, ивы, калины и др.) для длины волны возбуждения 0,355 мкм [3,12-23] и для близких к ней длин волн, например, 0,36 мкм [25]. Основное внимание при записи в банк данных уделялось растениям, для которых имеются спектры флуоресценции для нормального состояния и для стрессового состояния (когда растение находится в условиях неблагоприятных для развития).

Примеры спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в нормальных условиях и в условиях неблагоприятных для развития показаны на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 [16] приведены характерные спектры лазерно-индуцированной флуоресценции растительности в нормальных условиях.

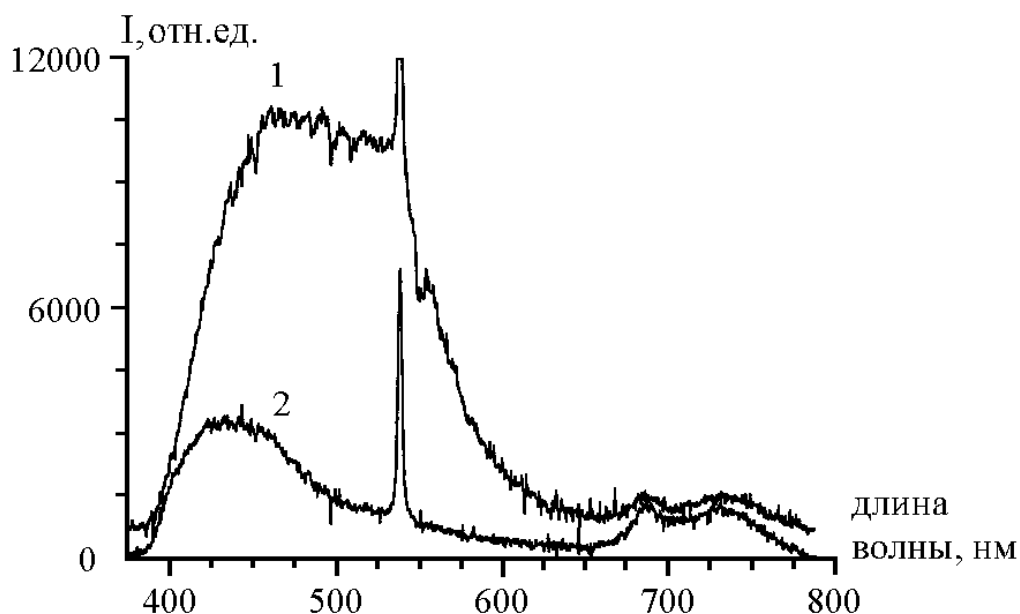


Рис.1 Спектры флуоресценции здоровой растительности. 1 – трава, 2 – тополь.

Обозначения на рисунке 1: 1 - трава; 2 – листья тополя (высокие всплески в середине спектров – излучение на второй гармонике лазера).

На рисунке 2 [24] приведен характерный спектр лазерно-индуцированной флуоресценции растительности в неблагоприятных для развития условиях. Здесь приведены спектры флуоресценции листа кукурузы как в нормальном состоянии (кривая 1), так и (кривая 2) в условиях стресса, вызванного отсутствием азотных удобрений в почве.

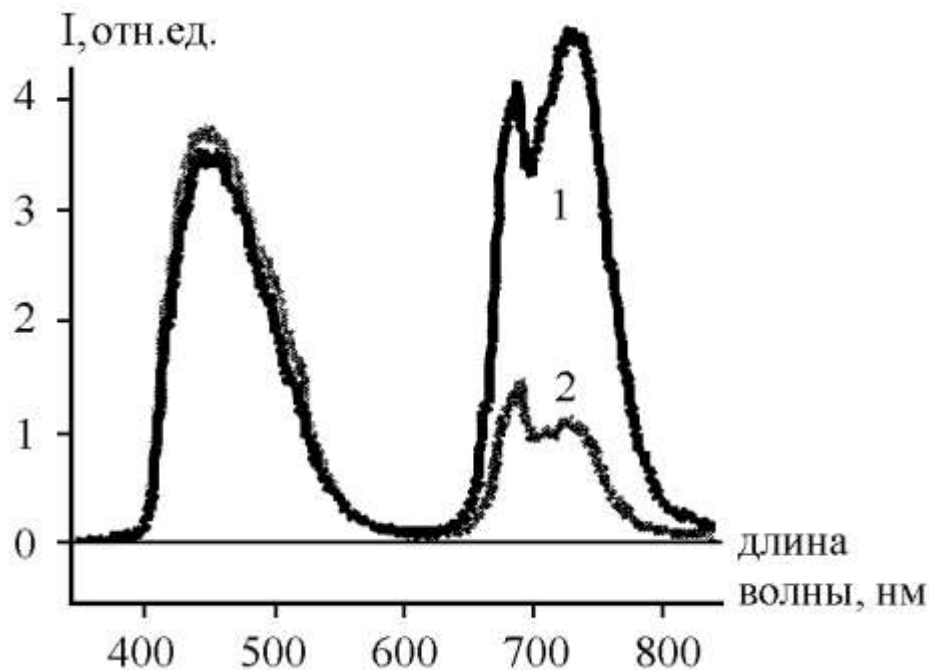


Рис.2 Спектр флуоресценции листа кукурузы в нормальном состоянии и в условиях стресса. 1 - нормальное состояние, 2 – состояние стресса.

Спектры флуоресценции растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях (в стрессовом состоянии), отличаются от спектров флуоресценции растительности, находящейся в нормальных условиях.

Это отличие является физической основой обнаружения стрессового состояния растений путем регистрации спектров флуоресценции.

Однако, флуориметр, регистрирующий спектр флуоресценции в широком спектральном диапазоне, не подходит для целей оперативного дистанционного контроля состояния растений (слишком большой объем информации приходилось бы обрабатывать).

Для измерений в масштабе времени близком к реальному используются флуориметры, регистрирующие флуоресцентное излучение только в нескольких (в подавляющем большинстве случаев в двух) информационных спектральных каналах и оперативно проводящие обработку данных измерений.

В качестве идентифицирующего параметра (показывающего наличие или отсутствие стрессового состояния растения) используется отношение $R_{\lambda_1;\lambda_2}$ интенсивностей флуоресценции, регистрируемых приемником флуориметра в двух узких спектральных диапазонах (шириной обычно 5...20 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 в узком спектральном диапазоне с центральной длиной волны λ .

Например, из рисунка 2 видно, что для растения в условиях стресса характерно увеличение отношения интенсивности флуоресценции на длинах волн 0,68...0,69 мкм к интенсивности флуоресценции на длинах волн 0,73...0,74 мкм.

В работах разных авторов используются информационные каналы с разными центральными длинами волн и, соответственно, разные идентифицирующие параметры

$$R_{\lambda_1;\lambda_2} : R_{0,45;0,52}, R_{0,45;0,685}, R_{0,45;0,735}, R_{0,52;0,685}, R_{0,52;0,735}, \\ R_{0,685;0,735}, R_{0,69;0,74}, R_{0,44;0,74}, R_{0,44;0,69}, R_{0,44;0,735}, R_{0,44;0,535}, \\ R_{0,69;0,735}, R_{0,44;0,52}, R_{0,47;0,54}, R_{0,47;0,69}, R_{0,47;0,74}, R_{0,54;0,69}, R_{0,54;0,74}.$$

Анализ эффективности и частоты использования различных идентифицирующих параметров позволил отобрать наиболее используемые сочетания информационных каналов: 0,69 (0,685) мкм и 0,74 (0,735) мкм; 0,44 (0,45) мкм 0,69 (0,685) мкм; 0,44 (0,45) мкм и 0,74 (0,735) мкм.

Для информационных каналов с этими центральными длинами волн в работе проводилось математическое моделирование. Рассчитывались значения идентифицирующих параметров

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

для растений в нормальном и стрессовом состояниях. Спектральная ширина информационных каналов принималась равной 10 нм.

Считалось, что величины интенсивностей флуоресцентного излучения $I(\lambda_1)$ и $I(\lambda_2)$ являются случайными (из-за ошибок измерения). Средние значения величин $I(\lambda_1)$ и $I(\lambda_2)$ брались из экспериментальных спектров флуоресценции. Шум измерения полагался нормальным с нулевым средним значением и с относительным среднеквадратическим значением 1 – 10 %.

Далее проводился расчет (по 1000 шумовых реализаций) вероятности правильного обнаружения стрессового состояния растения (вероятности обнаружения стрессового состояния растения, когда растение находится в стрессовом состоянии) и вероятности ложных тревог (вероятности обнаружения стрессового состояния растения, когда растение находится в нормальном состоянии).

Решение об обнаружении стрессового состояния растения принималось при выполнении условия $R_{\lambda_1;\lambda_2} > R_{th}$, где R_{th} - пороговое значение информационного признака, которое выбиралось посередине между значениями информационного параметра $R_{\lambda_1;\lambda_2}$ для данного вида растения в нормальном и в стрессовом состоянии.

В качестве критерия оптимизации спектральных информационных каналов для задачи флуоресцентного контроля состояния растений в работе используется критерий максимума вероятности правильного обнаружения стрессового состояния растения при приемлемом значении вероятности ложных тревог.

3. Анализ результатов математического моделирования и определение информационных каналов для флуоресцентного контроля состояния растений

На рисунке 3 представлены результаты расчетов идентифицирующего параметра $R_{\lambda_1;\lambda_2}$, равного отношению интенсивностей флуоресценции в двух узких спектральных информационных каналах регистрации шириной 10 нм с центральными длинами волн $\lambda_1 = 0,69$ и $\lambda_2 = 0,74$ мкм.

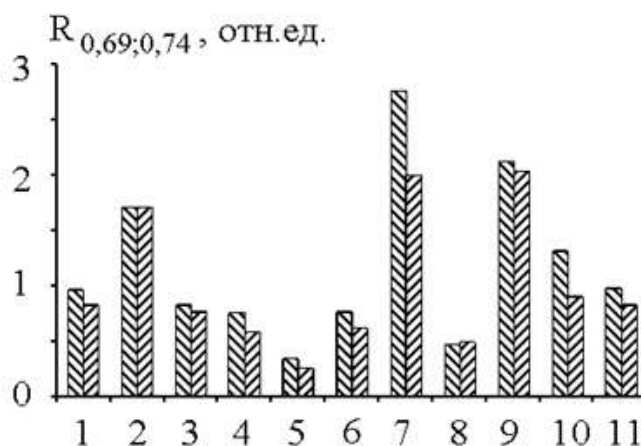


Рис.3. Параметр $R_{0,69;0,74}$ для растений в нормальном и стрессовом состоянии

На рисунке первый столбец соответствует идентифицирующему параметру $R_{\lambda_1; \lambda_2}$ для стрессового состояния растения, а второй столбец – для нормального состояния растения.

По горизонтальной оси отложен номер i растения в банке данных: 1- пшеница (стрессовое состояние вызвано внесением в грунт кадмия) [15]; 2 – кукуруза (стрессовое состояние вызвано дефицитом азотных удобрений в грунте) [17,20]; 3- табак (стрессовое состояние вызвано механическим повреждением - разрезанием растения) [17,20]; 4- рододендрон (стрессовое состояние вызвано инсоляцией) [17,20]; 5- фасоль (стрессовое состояние вызвано клещами) [17,20]; 6- табак (стрессовое состояние вызвано использованием пестицидов) [17,20]; 7- горох (стрессовое состояние вызвано внесением в грунт кадмия) [22]; 8- пшеница (стрессовое состояние вызвано внесением в грунт никеля) [21]; 9- кукуруза (стрессовое состояние вызвано внесением в грунт кадмия) [23]; 10- кукуруза (стрессовое состояние вызвано дефицитом азотных удобрений в грунте) [24]; 11- кукуруза (стрессовое состояние вызвано дефицитом сульфатных удобрений в грунте) [24].

Для спектральных информационных каналов регистрации с центральными длинами волн $\lambda_1=0,69$ и $\lambda_2=0,74$ мкм результаты математического моделирования вероятности правильного обнаружения P_c стрессового состояния растений и вероятности ложных тревог P_f при разной величине относительного среднеквадратического значения погрешностей измерений δ приведены в таблице 1.

Номера i растений в таблице 1 соответствуют номерам i растений на рисунке 3.

Таблица 1. Вероятности правильного обнаружения стрессового состояния и вероятности ложной тревоги (%). Центральные длины волн информационных каналов $\lambda_1=0,69$ и $\lambda_2=0,74$ мкм.

номер i растения	P_c			P_f		
	$\delta=2\%$	$\delta=6\%$	$\delta=10\%$	$\delta=2\%$	$\delta=6\%$	$\delta=10\%$
1	99,99	87,079	76,708	0,11	16,772	29,753
2	49,875	49,875	49,875	50,225	50,225	50,225
3	94,309	70,477	62,976	3,88	28,243	36,654
4	>99,9	94,309	83,288	<0,1	1,72	10,381
5	>99,9	96,45	86,409	<0,1	0,56	6,681
6	>99,9	91,399	79,628	<0,1	3,88	14,711
7	>99,9	95,72	83,928	<0,1	1,92	9,511
8	99,96	87,329	73,637	<0,1	8,891	19,542
9	74,777	56,956	52,195	23,812	39,454	41,864
10	>99,9	97,64	87,579	<0,1	0,63	6,611
11	99,83	82,558	69,537	0,05	13,051	23,772

Для спектральных информационных каналов регистрации с центральными длинами волн $\lambda_1=0,44$ и $\lambda_2=0,69$ мкм результаты математического моделирования вероятности правильного обнаружения P_c стрессового состояния растений и вероятности ложных тре-

вог P_f при разной величине относительного среднеквадратического значения погрешностей измерений δ приведены в таблице 2.

Номера i растений в таблице 2 соответствуют номерам i растений на рисунке 3.

Таблица 2. Вероятности правильного обнаружения стрессового состояния и вероятности ложной тревоги (%). Центральные длины волн информационных каналов $\lambda_1=0,44$ и $\lambda_2 =0,69$ мкм.

номер i растения	P_c			P_f		
	$\delta=2\%$	$\delta=6\%$	$\delta=10\%$	$\delta=2\%$	$\delta=6\%$	$\delta=10\%$
1	>99,9	98,68	89,939	<0,1	0,24	4,54
2	>99,9	98,5	90,359	<0,1	0,05	2,31
3	>99,9	>99,9	>99,9	<0,1	0,01	1,16
4	>99,9	>99,9	99,99	<0,1	<0,1	<0,1
5	>99,9	>99,9	98,59	<0,1	<0,1	<0,1
6	>99,9	>99,9	>99,9	<0,1	<0,1	0,05
7	99,9	84,208	70,867	0,03	11,801	22,622
8	>99,9	>99,9	99,63	<0,1	<0,1	<0,1
9	>99,9	98,34	90,499	<0,1	4,45	16,172
10	>99,9	>99,9	99,7	<0,1	<0,1	<0,1
11	80,828	59,486	53,765	17,842	36,684	40,274

Результаты математического моделирования показывают:

- довольно высокую надежность обнаружения стрессовых состояний растений при использовании спектральных информационных каналов как с центральными длинами волн $\lambda_1=0,69$ и $\lambda_2 =0,74$ мкм, так и с центральными длинами волн $\lambda_1=0,44$ и $\lambda_2 =0,69$ мкм;

- при использовании спектральных информационных каналов с центральными длинами волн $\lambda_1=0,44$ и $\lambda_2 =0,69$ мкм для большинства растений реализуются более высокие вероятности правильного обнаружения и более низкие вероятности ложных тревог;

- для обеспечения вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог приведенных в таблицах 1 и 2 приходится выбирать индивидуальный порог (принятия решения) для каждого растений (на практике это можно сделать на предварительном этапе измерений);

- представляется перспективным проводить мониторинг состояния растений при использовании трех спектральных информационных каналов с центральными длинами волн $\lambda_1=0,44$; $\lambda_2 =0,69$ мкм и $\lambda_3 =0,74$ мкм для получения высоких вероятностей правильного обнаружения и низких вероятности ложных тревог для всех растений.

Заключение

Проведено математическое моделирование и определение оптимальных информационных каналов регистрации для лазерного флуоресцентного метода обнаружения участков растительности, находящейся в стрессовом состоянии из-за неблагоприятных для разви-

тия условий, для длины волны возбуждения флуоресценции 0,355 мкм. Показано, что высокая надежность обнаружения может быть обеспечена при использовании спектральных информационных каналов как с центральными длинами волн 0,69 и 0,74 мкм, так и с центральными длинами волн 0,44 и 0,69 мкм. При этом, использование спектральных информационных каналов с центральными длинами волн 0,44 и 0,69 мкм позволяет обеспечить для большинства растений более высокие вероятности правильного обнаружения и более низкие вероятности ложных тревог. Представляется перспективным проводить мониторинг состояния растений при использовании трех спектральных информационных каналов с центральными длинами волн 0,44; 0,69 мкм и 0,74 мкм для получения высоких вероятностей правильного обнаружения и низких вероятности ложных тревог для всех растений.

Список литературы

1. Jian Yang, Wei Gong, Shuo Shi, Lin Du, Jia Sun, Sha-lei Song. Laser-induced fluorescence characteristics of vegetation by a new excitation wavelength // *Spectroscopy Letters*. 2016. Vol. 49. No. 4. Pp. 263–267. DOI: [10.1080/00387010.2016.1138311](https://doi.org/10.1080/00387010.2016.1138311)
2. Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Болвачев В.В., Городничев В.А. Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений для стрессовых состояний, вызванных механическим повреждением корневой системы // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* 2014. № 12. С. 534-549. DOI: [10.7463/1214.0739882](https://doi.org/10.7463/1214.0739882)
3. Jian Yang, Wei Gong, Shuo Shi, Lin Du, Jia Sun, Sha-lei Song. The effective of different excitation wavelengths on the identification of plant species based on fluorescence lidar // *Intern. archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: XXIII Congress (Prague, Czech Rep, July 12-19, 2016)*. 2016. Vol. XLI-B1. Pp. 147-150. DOI: [10.5194/isprsarchives-XLI-B1-147-2016](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-147-2016)
4. Saito K. Plant and vegetation monitoring using laser-induced fluorescence spectroscopy // *Fukuchi T., Shiina T. Industrial applications of laser remote sensing*. Sharjah: Bentham Science, 2012. Pp. 99-114. DOI: [10.2174/97816080534071120101](https://doi.org/10.2174/97816080534071120101)
5. Hedimbi M., Singh S., Kent A. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants // *Natural Science*. 2012. Vol. 4. No. 6. Pp. 395-401. DOI: [10.4236/ns.2012.46054](https://doi.org/10.4236/ns.2012.46054)
6. Афонасенко А.В., Иглакова А.Н., 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.
7. Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Дистанционный лазерный флуориметр для обнаружения стрессовых состояний растительности // *Радиооптика*. 2017. № 1. С. 1-13. DOI: [10.24108/rdopt.0117.0000082](https://doi.org/10.24108/rdopt.0117.0000082)
8. Pandey J. K., Gopal R. Laser-induced chlorophyll fluorescence and reflectance spectroscopy of cadmium treated *Triticum aestivum* L. plants // *Spectroscopy*. 2011. Vol. 26. No. 2. Pp. 129-139. DOI: [10.3233/SPE-2011-0530](https://doi.org/10.3233/SPE-2011-0530)

9. Лысенков В.С., Вардуни Т.В., Соьер В.Г., Краснов В.П. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4-1. С. 112-120.
10. Ничипорович А.А., Овчаров К.Е. КПД зеленого листа, витамины в растениях: Структурная организация фотосинтетического аппарата растений. Режим доступа: <http://lsdinfo.org/strukturnaya-organizaciya-fotosinteticheskogo-apparata-rastenij> (дата обращения 14.09.2015).
11. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
12. Chappelle E.W, Corp L.A., [McMurtrey J.E.](#), Kim M.S., [Daughtry C.S.T.](#) Fluorescence: a diagnostic tool for the detection of stress in plants // *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*. 1997. Vol. 2959. Pp.14-23. DOI: [10.1117/12.264261](https://doi.org/10.1117/12.264261)
13. Apostol S. Leaf fluorescence as diagnostic tool for monitoring vegetation // *From cells to proteins: Imaging nature across dimensions*. Dordrecht: Springer, 2005. Pp. 423-430.
14. Saito Y. Laser-induced fluorescence spectroscopy/ technique as a tool for field monitoring of physiological status of living plants // *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*. 2007. Vol. 6604. Pp. 66041W-1- 66041W-12. DOI: [10.1117/12.727194](https://doi.org/10.1117/12.727194)
15. Mishra K. B., Gopal R. Study of laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings growing under cadmium stress // *General and Applied Plant Physiology*. 2005. Vol. 31. No. 3-4. Pp. 181-196.
16. Snels M., Guarini R., Dell'Aglio M. First results obtained with a lidar fluorescence sensor system // *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*. 2000. Vol. 4070. Pp. 100-107. DOI: [10.1117/12.378144](https://doi.org/10.1117/12.378144)
17. [Lichtenthaler H.K.](#), [Wenzel O.](#), [Buschmann C.](#), [Gitelson A.](#) Plant stress detection by reflectance and fluorescence // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1998. Vol. 851. Pp. 271-285. DOI: [10.1111/j.1749-6632.1998.tb09002.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb09002.x)
18. 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. Pp. 431-437. DOI: [10.1364/AO.37.000431](https://doi.org/10.1364/AO.37.000431)
19. Edner H., Johansson J., Svanberg S., Wallinder E., Bazzani M., Breschi B., Cecchi G., Pantani L., Radicati B., Raimondi V., Tirelli D., Valmori G., Mazzinghi P. Laser-induced fluorescence monitoring of vegetation in Tuscany // *EARSel Advances in Remote Sensing*. 1992. Vol. 1. No. 2. Pp. 119-130.
20. [Lichtenthaler H.K.](#), [Subhash N.](#), [Wenzel O.](#), Mische J.A. Laser-induced imaging of blue/red and blue/far-red fluorescence ratios, F440/F690 and F440/F740, as a means of early stress detection in plants // *Intern. geoscience and remote sensing symp.: IGARSS'97 (Singapore, August 3-8, 1997): Proc. N.Y.: IEEE, 1997. Vol. 4. Pp. 1799-1801. DOI: [10.1109/IGARSS.1997.609078](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.609078)*

21. Mishra K.B., Gopal R. Detection of nickel-induced stress using laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings // Intern. J. of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. No. 1. Pp. 157-173. DOI: [10.1080/01431160701280975](https://doi.org/10.1080/01431160701280975)
22. Maurya R., Gopal R. Laser-induced fluorescence ratios of *Cajanus cajan* L. under the stress of cadmium and its correlation with pigment content and pigment ratios // Applied Spectroscopy. 2008. Vol. 62. No. 4. Pp. 433- 438.
23. 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. No. 1. Pp. 29-35.
DOI: [10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001)
24. Samson G., Tremblay N., Dudelzak A.E., Babichenko S.M., Dextraze L., Wollring J. Nutrient stress of corn plants: Early detection and discrimination using a compact multiwavelength fluorescent lidar // EARSeL eProceedings. 2001. Vol. 1. No. 1. Pp. 214-223.

Optimization of Spectral Data Channels for Fluorescence Vegetation Monitoring

M.L. Belov^{1,*}, A.A. Cherpakova¹,

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

V.A. Gorodnichev¹, S.V. Alykov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: spectral data channels, laser-induced fluorescence, fluorescence spectra database, vegetation monitoring

Currently, vegetation monitoring is one of the promising trends in remote sensing.

The paper considers the search of optimal spectral data channels for remote (noncontact) fluorescent vegetation monitoring, with the wavelength in a long-wave ultraviolet spectral range used for fluorescence excitation.

Based on the experimentally measured spectra of the laser-induced fluorescence, the paper conducts mathematical simulation and determines optimal data recording channels for the laser fluorescent method to detect vegetation areas under stress because of adverse evolution conditions for eye-safe laser fluorescence excitation wavelength of 0.355 μm .

A fluorescence spectra database is created to contain different types of plants in normal and adverse conditions for evolution.

Based on the experimentally measured laser-induced fluorescence spectra of a variety of plants, the probabilities of proper detection and false alarms are obtained to solve a problem of detecting vegetation areas under stress.

It has been shown that for eye-safe laser wavelength of 0.355 μm the high detection reliability can be provided using the spectral data channels with the central wavelengths both of 0.69 and 0.74 μm and of 0.44 and 0.69 μm .

Using spectral data channels with the central wavelengths of 0.44 and 0.69 μm allows providing the higher probability of the proper detection of vegetation stress and the lower false alarm probability for most of the plants.

It seems promising to conduct vegetation monitoring using three spectral data channels with the central wavelengths of 0.44, 0.69 and 0.74 μm to obtain the high probability of detection and the low false alarm probability for all of the plants.

References

1. Jian Yang, Wei Gong, Shuo Shi, Lin Du, Jia Sun, Sha-lei Song. Laser-induced fluorescence characteristics of vegetation by a new excitation wavelength. *Spectroscopy Letters*, 2016, vol. 49, no. 4, pp. 263–267. DOI: [10.1080/00387010.2016.1138311](https://doi.org/10.1080/00387010.2016.1138311)

2. Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Bolvachev V.V., Gorodnichev V.A. Experimental study of laser fluorescence method for remote plant stress sensing in situations induced by mechanical injury of plant root system. *Nauka i obrazovanie. MGTU im N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2014, no. 12, pp. 534-549.
DOI: [10.7463/1214.0739882](https://doi.org/10.7463/1214.0739882) (in Russian)
3. Jian Yang, Wei Gong, Shuo Shi, Lin Du, Jia Sun, Sha-lei Song. The effective of different excitation wavelengths on the identification of plant species based on fluorescence lidar. *Intern. archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: XXIII Congress (Prague, Czech Rep, July 12-19, 2016)*. 2016. Vol. XLI-B1. Pp. 147-150.
DOI: [10.5194/isprsarchives-XLI-B1-147-2016](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-147-2016)
4. Saito K. Plant and vegetation monitoring using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Fukuchi T., Shiina T. Industrial applications of laser remote sensing*. Sharjah: Bentham Science, 2012. Pp. 99-114. DOI: [10.2174/97816080534071120101](https://doi.org/10.2174/97816080534071120101)
5. Hedimbi M., Singh S., Kent A. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants. *Natural Science*, 2012, vol. 4, no. 6, pp. 395-401. DOI: [10.4236/ns.2012.46054](https://doi.org/10.4236/ns.2012.46054)
6. Afonassenko 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).
7. Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Remote laser fluorimeter to detect stress of plants. *Radiooptika* [Radiooptics], 2017, no. 1, pp. 1-13.
DOI: [10.24108/rdopt.0117.0000082](https://doi.org/10.24108/rdopt.0117.0000082) (in Russian)
8. Pandey J. K., Gopal R. Laser-induced chlorophyll fluorescence and reflectance spectroscopy of cadmium treated *Triticum aestivum* L. plants. *Spectroscopy*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 129-139. DOI: [10.3233/SPE-2011-0530](https://doi.org/10.3233/SPE-2011-0530)
9. Lysenko V.S., Varduni T.V., Sojer V.G., Krasnov V.P. Plant chlorophyll fluorescence as an environmental stress characteristic: a theoretical basis of the method application. *Fundamental'nye issledovaniia* [Fundamental Research], 2013, no. 4-1, pp. 112-120 (in Russian).
10. Nichiporovich A.A., Ovcharov K.E. *KPD zelenogo lista, vitamin v rasteniiakh: Strukturnaia organizatsiia fotosinteticheskogo apparata rastenij* [Efficiency of green leaf, vitamins in plants: Structural organization of plant photosynthetic device]. Available at: <http://lsdinfo.org/strukturnaya-organizaciya-fotosinteticheskogo-apparata-rastenij>, accessed 09.03.2017 (in Russian).
11. *GOST 31581-2012. Lazernaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniia pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdelij* [Laser safety. General safety requirements for development and operation of laser products]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 19 p. (in Russian).
12. Chappelle E.W, Corp L.A., [McMurtrey](#) J.E., Kim M.S., [Daughtry](#) C. Fluorescence: a diagnostic tool for the detection of stress in plants. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 1997, vol. 2959, pp. 14-23. DOI: [10.1117/12.264261](https://doi.org/10.1117/12.264261)

13. Apostol S. Leaf fluorescence as diagnostic tool for monitoring vegetation. *From cells to proteins: Imaging nature across dimensions*. Dordrecht: Springer, 2005. Pp. 423-430.
14. Saito Y. Laser-induced fluorescence spectroscopy/ technique as a tool for field monitoring of physiological status of living plants. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2007, vol. 6604, pp. 66041W-1- 66041W-12. DOI: [10.1117/12.727194](https://doi.org/10.1117/12.727194)
15. Mishra K.B., Gopal R. Study of laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings growing under cadmium stress. *General and Applied Plant Physiology*, 2005, vol. 31, no. 3-4, pp. 181-196.
16. Snels M., Guarini R., Dell'Aglio M. First results obtained with a lidar fluorescence sensor system. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2000, vol. 4070, pp. 100-107. DOI: [10.1117/12.378144](https://doi.org/10.1117/12.378144)
17. [Lichtenthaler H.K.](#), [Wenzel O.](#), [Buschmann C.](#), [Gitelson A.](#) Plant stress detection by reflectance and fluorescence. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1998, vol. 851, pp. 271-285. DOI: [10.1111/j.1749-6632.1998.tb09002.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb09002.x)
18. 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, pp. 431-437. DOI: [10.1364/AO.37.000431](https://doi.org/10.1364/AO.37.000431)
19. Edner H., Johansson J., Svanberg S., Wallinder E., Bazzani M., Breschi B., Cecchi G., Pantani L., Radicati B., Raimondi V., Tirelli D., Valmori G., Mazzinghi P. Laser-induced fluorescence monitoring of vegetation in Tuscany. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 1992, vol. 1, no. 2, pp. 119-130.
20. [Lichtenthaler H. K.](#), [Subhash N.](#), [Wenzel O.](#), Mische J.A. Laser-induced imaging of blue/red and blue/far-red fluorescence ratios, F440/F690 and F440/F740, as a means of early stress detection in plants. *Intern. geoscience and remote sensing symp.: IGARSS'97* (Singapore, August 3-8, 1997): Proc. N.Y.: IEEE, 1997. Vol. 4. Pp. 1799-1801. DOI: [10.1109/IGARSS.1997.609078](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.609078)
21. Mishra K.B., Gopal R. Detection of nickel-induced stress using laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings. *Intern. J. of Remote Sensing*, 2008, vol. 29, no. 1, pp. 157- 173. DOI: [10.1080/01431160701280975](https://doi.org/10.1080/01431160701280975)
22. Maurya R., Gopal R. Laser-induced fluorescence ratios of *Cajanus cajan* L. under the stress of cadmium and its correlation with pigment content and pigment ratios. *Applied Spectroscopy*, 2008, vol. 62, no. 4, pp. 433-438.
23. 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, no. 1, pp. 29-35. DOI: [10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001)
24. Samson G., Tremblay N., Dudelzak A.E., Babichenko S.M., Dextraze L., Wollring J. Nutrient stress of corn plants: Early detection and discrimination using A compact multiwavelength fluorescent lidar. *EARSeL eProceedings*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 214-223.