

УДК 504.064.36

Оптимизация параметров информационных каналов для лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений

Белов М. Л.^{1,*}, Булло О. А.¹,

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

Алборова А. Л.¹, Городничев В. А.¹

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

Рассмотрена задача оптимизации информационных спектральных каналов лазерного флуоресцентного измерителя, предназначенного для контроля состояния растений. Методом математического моделирования с использованием экспериментально измеренных спектров флуоресценции определены оптимальные центральные длины волн информационных спектральных диапазонов, их спектральная ширина и параметры алгоритма обработки в случае двух информационных спектральных каналов. Показано, что использование дополнительного третьего информационного спектрального диапазона позволяет заметно улучшить вероятностные характеристики обнаружения стрессовых состояний растений.

Ключевые слова: информационные спектральные каналы, оптимизация параметров, лазерный измеритель, контроль состояния растений, вероятностные характеристики

Введение

Значительная часть территории Российской Федерации представлена районами неустойчивого увлажнения, для которых в летний период характерны недостаток осадков и высокие температуры. Эту ситуацию усугубляет и отмечаемая в последние десятилетия тенденция усиления нестабильности погодных условий. Во многих ранее относительно благополучных в этом отношении регионах растения все чаще подвергаются экстремальному воздействию температурного и водного стрессовых факторов. Вследствие бесконтрольного орошения, отсутствия или недостаточных темпов мелиоративных мероприятий возникает и другая проблема - увеличение доли засоленных почв в общем земельном фонде.

В связи с этим возникает естественный интерес к возможности как получения целостной информации о состоянии биологических систем, так и к возможности применения дистанционного контроля и учета в сельском хозяйстве.

Одним из перспективных направлений контроля состояния растительности является флуоресцентный анализ, так как он потенциально позволяет дистанционно и оперативно контролировать состояния растений по характеристикам их флуоресцентного излучения.

В настоящее время разработаны различные приборы для лазерного флуоресцентного контроля состояния растений (см., например, [1-13]). Однако, многие вопросы важные для практики остаются неясными. Наибольшее число этих вопросов связано с параметрами приемных каналов для регистрации информационных сигналов, позволяющих судить о состоянии контролируемых растений.

Постановка задачи

Работа лазерных флуориметров для контроля состояний растений основана на облучении растений лазером (для возбуждения излучения флуоресценции) и регистрации приемником лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения.

Наиболее важными информационными признаками флуоресцентного излучения растений являются временные характеристики спада флуоресцентного сигнала и форма спектров флуоресценции.

Поскольку данных о временных характеристиках спада флуоресцентного сигнала от растительности в настоящее время очень мало, то более надежным представляется контроль состояния растительности по форме спектров флуоресцентного излучения. Форма спектров флуоресценции растительности в нормальном состоянии отличается от формы спектров флуоресценции растительности в стрессовых состояниях. Это потенциально позволяет контролировать состояние растений путем регистрации информации о форме спектров флуоресценции.

В данной статье мы ограничиваемся спектральной информацией, содержащейся в форме спектра флуоресценции. Есть еще доступная для измерения информация о величине сигнала флуоресценции, но здесь возникают проблемы с калибровкой и проведением абсолютных измерений. В то время как для анализа регистрации формы спектра проводить абсолютные измерения не требуется.

Анализ формы спектра флуоресценции можно заменить на более простую задачу – анализ интенсивностей флуоресценции в нескольких спектральных диапазонах. Для дистанционного (например, с беспилотного летательного аппарата) и оперативного контроля состояния растений наиболее подходящим является флуориметр, регистрирующий не весь спектр флуоресценции в широком спектральном диапазоне, а флуориметр, регистрирующий флуоресцентное излучение в нескольких (наиболее информативных для задачи контроля состояния растений) спектральных диапазонах и проводящий тематическую обработку данных флуоресцентных измерений.

В опубликованных работах по этой тематике исследователи проводят измерение на длинах волн: 680 нм (или 685 или 690 нм) и 740 нм (или 735 или 730 нм), однако, используются и три длины волны регистрации. В качестве критерия обнаружения стрессовых состояний растений используется отношение интенсивности флуоресценции на регистрируемых информационных длинах волн и пороговый алгоритм (сравнивают отношение интенсивности флуоресценции на регистрируемых информационных длинах волн с некоторым пороговым значением $R_{\text{пор}}$).

Однако, на сегодняшний день многие вопросы остаются неясными:

- сколько информационных спектральных диапазонов лучше использовать;
- какие наилучшие центральные длины волн этих информационных спектральных диапазонов;
- какова наилучшая ширина этих информационных спектральных диапазонов;
- каково наилучшее значение порога для порогового алгоритма и есть ли лучший алгоритм обработки данных измерений.

Цель работы - определение (на основе математического моделирования с использованием экспериментально измеренных спектров флуоресценции) оптимальных (с точки зрения вероятностных характеристики обнаружения стрессовых состояний растений) параметров информационных каналов для лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений.

Математическое моделирование метода контроля состояния растений

Определение оптимальных параметров информационных каналов для лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений проводилось методом математического моделирования.

В качестве длины волны возбуждения принималась длина волны 0,532 мкм (вторая гармоника лазера на иттрий алюминиевом гранате, активированном ионами неодима). Эта длина волны имеет преимущество (перед другими лазерными длинами волн возбуждения) при разработке аппаратуры для дистанционного зондирования: источником ее является твердотельный лазер с большой энергией в импульсе (см., например, [12]), на этой длине волны большая эффективность возбуждения флуоресценции (см., например, [13]) и большая спектральная чувствительность фотоэлектронных умножителей (см., например, [14]).

Для длины волны 0,532 мкм был создан банк спектров лазерно-индуцированной флуоресценции листовых растений, на основе экспериментально полученных и приведенных в научной-технической литературе спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в нормальном и в стрессовом состоянии.

Для математического моделирования были взяты спектры в спектральном диапазоне 600..800 нм. В банке спектров лазерно-индуцированной флуоресценции к настоящему времени записаны экспериментально измеренные спектры разных видов трав; сельскохозяйственных культур – разных видов кукурузы, пшеницы, риса, сои; листьев фруктов, овощей, растений и цветов; лиственных деревьев – березы, тополя, вишни, пальмы и др.

Считалось, что значения интенсивностей флуоресценции искажены шумом, распределённым по нормальному закону (с нулевым средним значением). Моделирование проводилось при разной величине относительного среднеквадратического значения шума измерения. При вычислении вероятности правильного обнаружения $R_{ПО}$ стрессовых состояний растений (вероятности определения стрессовых состояний растений, когда они действительно есть) и вероятности ложным тревог $R_{ЛТ}$ (вероятности определения стрессовых состояний растений, когда их в действительности нет) использовались 10^4 шумовых реализаций.

Определение оптимальных параметров информационных каналов по результатам математического моделирования

Наиболее простым вариантом при контроле состояния растений является использование в качестве классифицирующего признака (характеризующего состояние растения - нормальное или стрессовое) отношения R интенсивностей флуоресценции на некоторых двух длинах волн λ_1 и λ_2 :

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

где $I(\lambda_i)$ - значение интенсивности флуоресценции в некотором спектральном диапазоне шириной Δ при центральной длине волны диапазона λ_i , вычисленное по формуле:

$$I(\lambda_i) = \frac{1}{\Delta} \int_{\lambda_i - \frac{\Delta}{2}}^{\lambda_i + \frac{\Delta}{2}} I(\lambda) d\lambda.$$

Значения вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог в зависимости от различных комбинация центральных длин волн λ_1 и λ_2 приведены в Таблице 1. Результаты математического моделирования, приведенные в таблице, получены при относительном среднеквадратическом значении шума измерения 4 %, $\Delta=10$ нм и пороговом значении $R_{пор} = 0,95$.

Таблица 1 Значения вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог в зависимости от различных комбинаций длин волн λ_1 и λ_2

Длины волн λ_1 и λ_2 , мкм	Вероятность $P_{\hat{11}}$, %	Вероятность $P_{\hat{00}}$, %
0,675; 0,735	53,0	0,001
0,680; 0,735	78,4	1,6
0,685; 0,735	92,3	10,2
0,690; 0,735	90,0	12,8
0,675; 0,740	60,0	0,002
0,680; 0,740	92,3	3,3
0,685; 0,740	98,9	12,1
0,690; 0,740	97,1	14,1
0,675; 0,745	76,4	0,6
0,680; 0,745	99,9	6,0
0,685; 0,745	99,9	14,9
0,690; 0,745	99,9	15,5
0,675; 0,750	96,1	4,4
0,680; 0,750	99,9	14,5
0,685; 0,750	99,9	20,1
0,690; 0,750	99,9	27,4

Из Таблицы 1 видно, что вероятности $P_{\text{ПО}}$ $P_{\text{ЛТ}}$ могут сильно изменяться даже при относительно небольших изменениях λ_1 и λ_2 .

Одним из наилучших вариантов является комбинация длин волн 0,675 и 0,750 мкм. Для этой комбинации длин волн в Таблице 2 приведены значения вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог в зависимости от ширины Δ информационных спектральных каналов (при относительном среднеквадратическом значении шума измерения 4% и пороговом значении $R_{\text{пор}} = 0,95$).

Таблица 2 Значения вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог в зависимости от ширины спектральных диапазонов Δ .

Ширина Δ , нм	Вероятность $P_{\text{ПО}}$, %	Вероятность $P_{\text{ЛТ}}$, %
20	96,9	4,39
15	96,4	4,37
10	96,1	4,35
5	96,2	4,35

Результаты, приведенные в Таблице 2, показывают, что значения вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог очень слабо (по крайней мере, для выбранных центральных длин волн) зависят от ширины Δ информационных спектральных каналов. Поэтому, для лазерного измерителя предпочтительней выбрать спектральную ширину Δ

по больше, например, $\Delta=15$ нм (чем больше ширина информационных спектральных каналов, тем больше величина полезного флуоресцентного сигнала).

Для комбинации центральных длин волн 0,675 и 0,750 мкм и $\Delta=15$ нм в Таблице 3 приведены значения вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог в зависимости от порогового значения $R_{пор}$ (при относительном среднеквадратическом значении шума измерения 4 %).

Таблица 3 Вероятности правильного обнаружения и ложных тревог в зависимости от $R_{пор}$

Пороговое значение $R_{пор}$	Вероятность $P_{ПО}$, %	Вероятность $P_{ЛТ}$, %
0.85	99.8	5.9
0.90	98.5	4.5
0.95	96.5	4.4
1.00	94.7	4.4
1.05	89.8	4.0

Из Таблицы 3 хорошо видно, что увеличение порогового значения $R_{пор}$ приводит к уменьшению вероятности правильного обнаружения $P_{ПО}$ и одновременному уменьшению вероятности ложных тревог $P_{ЛТ}$. Наиболее приемлемыми вариантами являются значения $R_{пор} = 0,90$ и $R_{пор} = 0,95$, при которых вероятности правильного обнаружения и ложных тревог равны, соответственно, $P_{ПО} = 98.5$ %, $P_{ЛТ} = 4.5$ % и $P_{ПО} = 96.5$ %, $P_{ЛТ} = 4.4$ %.

Зависимость вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог от $R_{пор}$ хорошо иллюстрирует и рисунок 1.

На рисунке 1 показаны (точками) значения отношения $R = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}$ для

экспериментально измеренных спектров флуоресценции растений в зависимости от j номера спектра в базе данных (для центральных длин волн 0,675 и 0,750 мкм, $\Delta=15$ нм). Здесь спектры с номерами от 0 до 47 соответствуют растениям в нормальном состоянии, а с номерами от 48 до 70 - растениям в стрессовом состоянии. Прямая горизонтальная линия – это пороговое значение $R_{пор} = 0,95$. Хорошо видно, что в условиях шумов измерения увеличение порогового значения $R_{пор}$ (подъем горизонтальной линии) приведет к уменьшению вероятности ложных тревог, но одновременно к уменьшению вероятности правильного обнаружения.

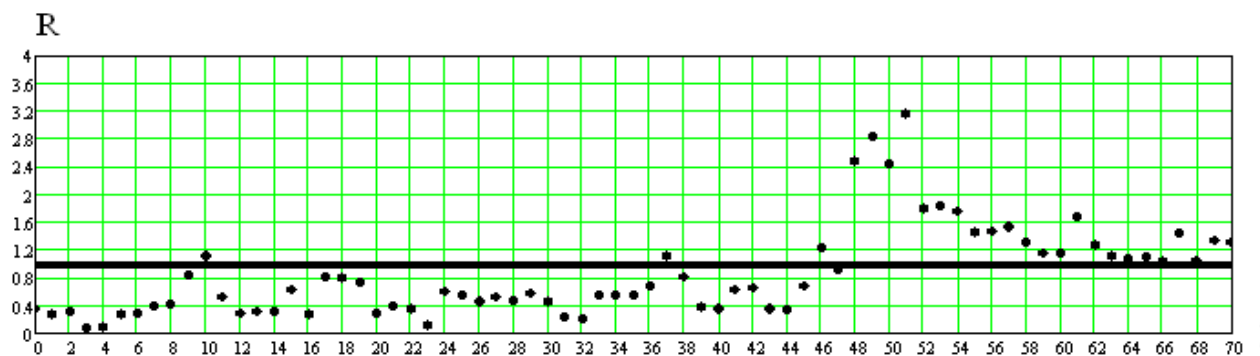


Рис.1. Значение отношения $R = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}$ в зависимости от j номера спектра в базе данных

Приведенные выше результаты относились к случаю регистрации излучения в двух информационных спектральных диапазонах. Регистрация излучения еще в одном информационном спектральном диапазоне потенциально позволяет улучшить статистические характеристики обнаружения (увеличить вероятность правильного обнаружения или уменьшить вероятность ложных тревог).

Регистрация излучения еще в одном информационном спектральном диапазоне позволяет вместо одного классифицирующего признака (отношения $R = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}$) сформировать два классифицирующих признака, используя, например, отношения $R1 = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}$ и $R2 = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_3)}$ в трех спектральных диапазонах с центральными длинами волн λ_1 , λ_2 и λ_3 .

Как показывает математическое моделирование одним из приемлемых вариантов для центральной длины волны λ_3 третьего информационного спектрального диапазона является $\lambda_3 = 0,685$ мкм. Для этой длины волны спектры флуоресценции из базы данных на двумерной плоскости классифицирующих признаков $R1$ и $R2$ представлены на рисунке 2.

На рисунке 2 точками показаны данные для экспериментально измеренных спектров флуоресценции растений из базы данных (для центральных длин волн $0,675$; $0,685$ и $0,750$ мкм, $\Delta = 15$ нм). Здесь черные точки соответствуют растениям в нормальном состоянии, а красные точки - растениям в стрессовом состоянии. Прямая синяя линия – разделительная линия $R1 = 0,6R2 + 0,5$, позволяющая эффективно разделить спектры растений в нормальном и стрессовом состояниях.

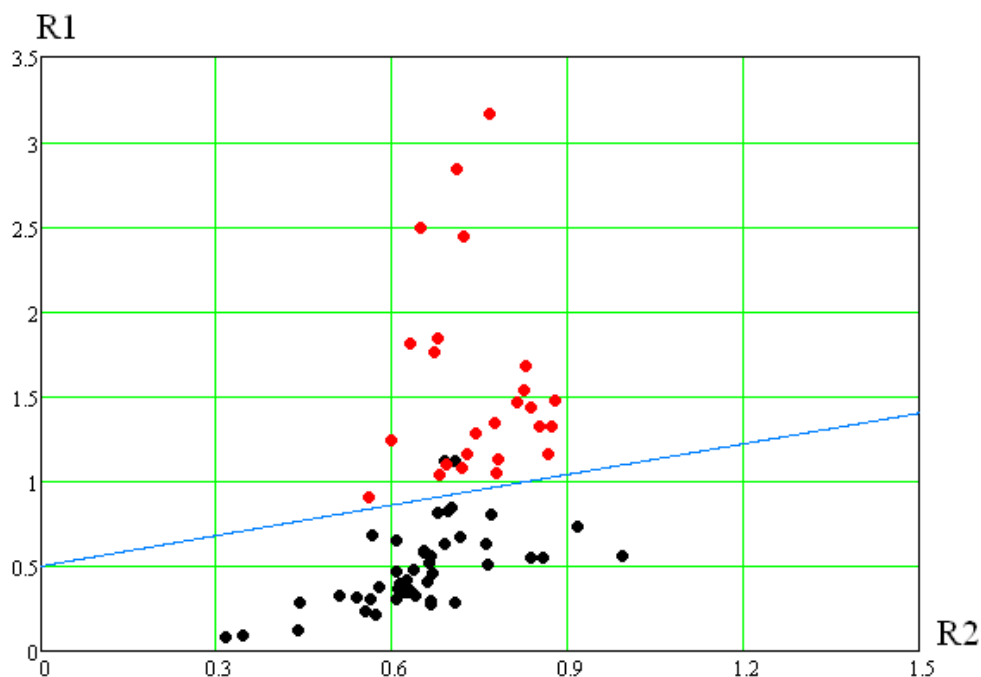


Рис.2. Спектры на двумерной плоскости классифицирующих признаков

Если точка в двумерном пространстве классифицирующих признаков лежит выше пороговой прямой, то растение находится (согласно алгоритму обработки) в стрессовом состоянии, если же ниже – то в нормальном состоянии. Для данного алгоритма при относительном среднеквадратическом значении шума измерения 4 % вероятность правильного обнаружения составляет $P_{ПО} = 97,7\%$, а вероятность ложных тревог $P_{ЛТ} = 3,8\%$.

Таким образом, использование третьего информационного спектрального мало изменила вероятность правильного обнаружения, но заметно уменьшила вероятность ложных тревог.

Заключение

Рассмотрена задача оптимизации информационных спектральных каналов лазерного флуоресцентного измерителя, предназначенного для контроля состояния растений. Методом математического моделирования с использованием экспериментально измеренных спектров флуоресценции определены оптимальные центральные длины волн информационных спектральных диапазонов, их спектральная ширина и параметры алгоритма обработки в случае двух информационных спектральных каналов. Показано, что использование дополнительного третьего информационного спектрального диапазона позволяет заметно улучшить вероятностные характеристики обнаружения стрессовых состояний растений.

Список литературы

1. Roshchina V.V. Vital Autofluorescence: Application to the Study of Plant Living Cells // International Journal of Spectroscopy. 2012. Vol. 2012. Article ID 124672. DOI: [10.1155/2012/124672](https://doi.org/10.1155/2012/124672)
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. DOI: [10.1366/10-06100](https://doi.org/10.1366/10-06100)
3. Приезжев А.В., Тучин В.В., Шубочкин Л.П. Лазерный флуоресцентный анализ // Лазерная диагностика в биологии и медицине. М.: Наука, 1989. С. 197-220.
4. Тимченко Е.В., Таскина Л.А. Применение оптических методов для контроля растений при внешнем воздействии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 4-1. С. 221-226.
5. 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. P. 75680G-1 - 75680G-8. DOI: [10.1117/12.839462](https://doi.org/10.1117/12.839462)
6. Флуоресцентный лидар // Лазерный Портал. Режим доступа: http://www.laserportal.ru/content_1003 (дата обращения 16.07.2015).
7. Hedimbi M., Singh S., Kent A. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants // Natural Science. 2012. Vol. 4, no. 6. P. 395-401. DOI: [10.4236/ns.2012.46054](https://doi.org/10.4236/ns.2012.46054)
8. 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. DOI: [10.1117/12.841257](https://doi.org/10.1117/12.841257)
9. Zulfugarov I.S. Photosynthesis and stress // Internet Photochemistry and Photobiology. An International Forum for Virtual Conferences: website. Режим доступа: <http://www.photobiology.com/photobiology99/contrib/zulfugarov/index.htm> (дата обращения 16.07.2015).
10. Gouveia-Neto A.S., Silva E.A., Oliveira R.A., Cunha P.C., Costa E.B., Câmara T.J.R., Willadino L.G. Water deficit and salt stress diagnosis through LED induced chlorophyll fluorescence analysis in *Jatropha curcas* L. oil plants for biodiesel // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 7902. P. 79020A-1 - 79020A-10. DOI: [10.1117/12.872991](https://doi.org/10.1117/12.872991)
11. Белов М.Л., Булло О.А., Федотов Ю.В., Городничев В.А. Лазерный метод контроля состояния растений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 2. С. 71-82.
12. 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.

13. 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, no. 4. P. 470-479. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00125-1)
14. Photosensor module H10720-20 // Hamamatsu: company website. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H10720-20/index.html> (дата обращения 20.07.2015).

Parameter Optimization of Information Channels for Laser Fluorescence Method of Vegetation Monitoring

M.L. Belov^{1,*}, O.A. Bullo¹,

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

A.L. Alborova¹, V.A. Gorodnichev¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: information spectral channels, parameter optimization, laser meter, remote sensing of plant stress, probabilistic characteristic

Nowadays, there is a growing interest in application of remote monitoring and accounting systems in agriculture.

One of the promising areas of remote vegetation monitoring is a fluorescence analysis, as it potentially allows sensing stress of plants according to characteristics of their fluorescent radiation.

The shape of the fluorescence spectra of vegetation in the normal condition differs from that of the fluorescence spectra of vegetation in stressful conditions. This potentially allows you to sense the plants by recording information about the shape of the fluorescence spectra.

Analysis of the fluorescence spectrum shape can be replaced by the analysis of fluorescence intensities in several spectral bands, which simplifies problem-solving.

Currently, there are various devices developed for laser fluorescence sensing of plant stress. However, a lot of issues important to the practice remain unclear.

Most of these issues concern the parameters of receiving channels to record information signals, which allow you to perceive the stress-sensed plants:

- how many information channels of spectral bands better to use;
- what the best width of these spectral bands of information is ;
- what is the best width of the spectral bands of information;
- what the best threshold value for the threshold algorithm is, and if there is the better algorithm to process measurement data.

The work uses mathematical modeling based on the experimentally measured fluorescence spectra to determine the optimal (in terms of probability of sensing characteristics of the stress of plants, i.e. the probability of good sense and false alarm) parameters of information channels for laser fluorescence method to sense the plant stress: the central wavelength of the information spectral bands, their spectral width, and parameters of the algorithm in the case of processing two spectral channels of information. It is shown that using the additional third information spec-

tral band allows you to improve significantly the probability characteristics of sensing stress of plants.

References

1. Roshchina V.V. Vital Autofluorescence: Application to the Study of Plant Living Cells. *International Journal of Spectroscopy*, 2012, vol. 2012, article ID 124672. DOI: [10.1155/2012/124672](https://doi.org/10.1155/2012/124672)
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, pp. 10-19. DOI: [10.1366/10-06100](https://doi.org/10.1366/10-06100)
3. Priezhev A.V., Tuchin V.V., Shubochkin L.P. Laser fluorescence analysis. In book: *Lazernaya diagnostika v biologii i meditsine* [Laser diagnostics in biology and medicine]. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 197-220. (in Russian).
4. Timchenko E.V., Taskina L.A. Application for optical controlling methods of plants under external influence. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4-1, pp. 221-226. (in Russian).
5. 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](https://doi.org/10.1117/12.839462)
6. Raimondi V., Cecchi G., Longnoli D., Palombi L., Ballerini G. Fluorescence LIDAR Technique for Cultural Heritage. In: Schreiner M., Strlič M., Salimbeni R., eds. *Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science*. Science for Heritage: A webpage for dissemination of heritage science projects and events. Available at: <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/chapters/lidar.htm> , accessed 01.07.2015.
7. 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)
8. 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](https://doi.org/10.1117/12.841257)
9. Zulfugarov I.S. *Photosynthesis and stress*. Internet Photochemistry and Photobiology. An International Forum for Virtual Conferences: website. Available at: <http://www.photobiology.com/photobiology99/contrib/zulfugarov/index.htm> , accessed 16.07.2015.
10. 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 flu-

- orescence 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)
11. Belov M.L., Bullo O.A., Fedotov Yu.V., Gorodnichev V.A. Laser Method for Vegetation Monitoring. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser, priborostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering*, 2015, no. 2, pp. 71-82. (in Russian).
 12. Afonasenko A.V., Iglakova A.N., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Prokopyev 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).
 13. 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, no. 4, pp. 470-479. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00125-1)
 14. Photosensor module H10720-20. Hamamatsu: company website. Available at: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H10720-20/index.html>, accessed 20.07.2015.