

Исследование стабильности спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений

07, июль 2014

DOI: [10.7463/0714.0718315](https://doi.org/10.7463/0714.0718315)

Федотов Ю. В.¹, Булло О. А.¹, Белов М. Л.^{1,a}, Городничев В. А.¹

УДК 504.064.36

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^abelov@bmstu.ru

Статья посвящена разработке лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений. Приведены результаты экспериментальных исследований спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений при длине волны возбуждения флуоресценции 532 нм. Показано, что величина отношения интенсивности флуоресценции на длине волны 680 нм к интенсивности флуоресценции на длине волны 740 нм характеризуется высокой стабильностью. Разброс этой величины отношения для разных образцов одного и того же растения выращенных в похожих условиях и одного образца растения в течение дня существенно меньше различия между собой этого отношения для разных растений и различия этого отношения для одного вида растения в нормальном и стрессовом состояниях.

Ключевые слова: Лазерный метод, растения, лазерно-индуцированная флуоресценция, спектры, стабильность

Введение

Наличие загрязнителей в почве, отсутствие или недостаточное количество воды и питательных веществ приводят к стрессовым ситуациям для растений и невозможности их нормального роста. Такие стрессовые ситуации сложно идентифицировать на ранних стадиях по внешнему виду растений. Поэтому важным является разработка методов и приборов обнаружения стрессовых состояний растений, как индикаторов недостаточного уровня питательных веществ или наличие загрязнителей в почве.

Эффективным дистанционным или неконтактным методом обнаружения стрессовых состояний растительности могут стать методы лазерной индуцированной флуоресценции [1-18]. Эти методы основаны на различии интенсивности флуоресценции и (или) формы спектра флуоресценции в нормальном и стрессовом состоянии растений.

Наиболее перспективным лазерным источником для создания бортовой аппаратуры контроля состояния растений является твердотельный импульсный лазер на длине волны 532 нм. Он имеет преимущество (при разработке аппаратуры для дистанционного зон-

дирования) 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). Кроме того, эффективность возбуждения флуоресценции на длине волны 532 нм существенно больше, чем на длинах волн 355 и 337 нм (см., например, [12]).

Статья посвящена экспериментальному исследованию лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений при длине возбуждения флуоресценции 532 нм.

1. Постановка задачи

Несмотря на то, что число работ, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований спектров флуоресценции здоровой растительности при длине возбуждения 532 нм, довольно велико (см., например, [1,12,15,16,18]), некоторые важные вопросы остаются неясными.

Одним из таких неясных вопросов остается вопрос о том, как соотносятся между собой, с одной стороны, естественный разброс спектров флуоресценции разных образцов одного и того же растения выращенных в похожих условиях и разброс спектров флуоресценции одного образца растения в течение дня, и, с другой стороны, различие между собой спектров флуоресценции разных растений и спектров флуоресценции одного вида растения в нормальном и стрессовом состояниях.

Другими словами неясным и совершенно неосвещенным в научной литературе остается вопрос о стабильности спектров флуоресценции растений (в частности, формы спектров).

В работе проводятся экспериментальные исследования стабильности спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений для измерений разных образцов одного и того же вида растения, измерений в течение длительного времени одного образца одного растения и разного вида растений для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм.

2. Эксперимент

Для исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений была создана лабораторная установка.

В качестве источника возбуждения излучения флуоресценции в лабораторной установке использована вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима (энергия лазерного импульса на длине волны 532 нм ~ 0,37 мДж со среднеквадратичным отклонением ~ 3 %).

Подсистема регистрации излучения флуоресцентного излучения построена на основе полихроматора и высокочувствительного матричного детектора с усилителем яркости.

В работе были проведены измерения спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в спектральном диапазоне 600 – 800 нм.

Экспериментальное исследование спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений включало в себя, как предварительный этап калибровку оборудования:

- калибровку полихроматора по длине волны с использованием калибровочного источника света на основе ртутно-аргоновой лампы с линейчатым спектром излучения;
- калибровку системы регистрации по чувствительности с использованием галогенной лампы с непрерывным спектром излучения.

Экспериментальные исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растительности проводились для быстрорастущих и неприхотливых видов растений – горчица, огуречная трава, различные виды салата, огурцов, газонной травы.

3. Анализ полученных экспериментальных данных

На рис. 1 - 11 приведены результаты экспериментального исследования стабильности спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений.

На рисунке 1 представлены результаты измерений в течение длительного времени одного образца одного растения. Здесь показаны спектры флуоресценции образца огуречной травы, снятые в течение 5 часов с интервалом 15 минут.

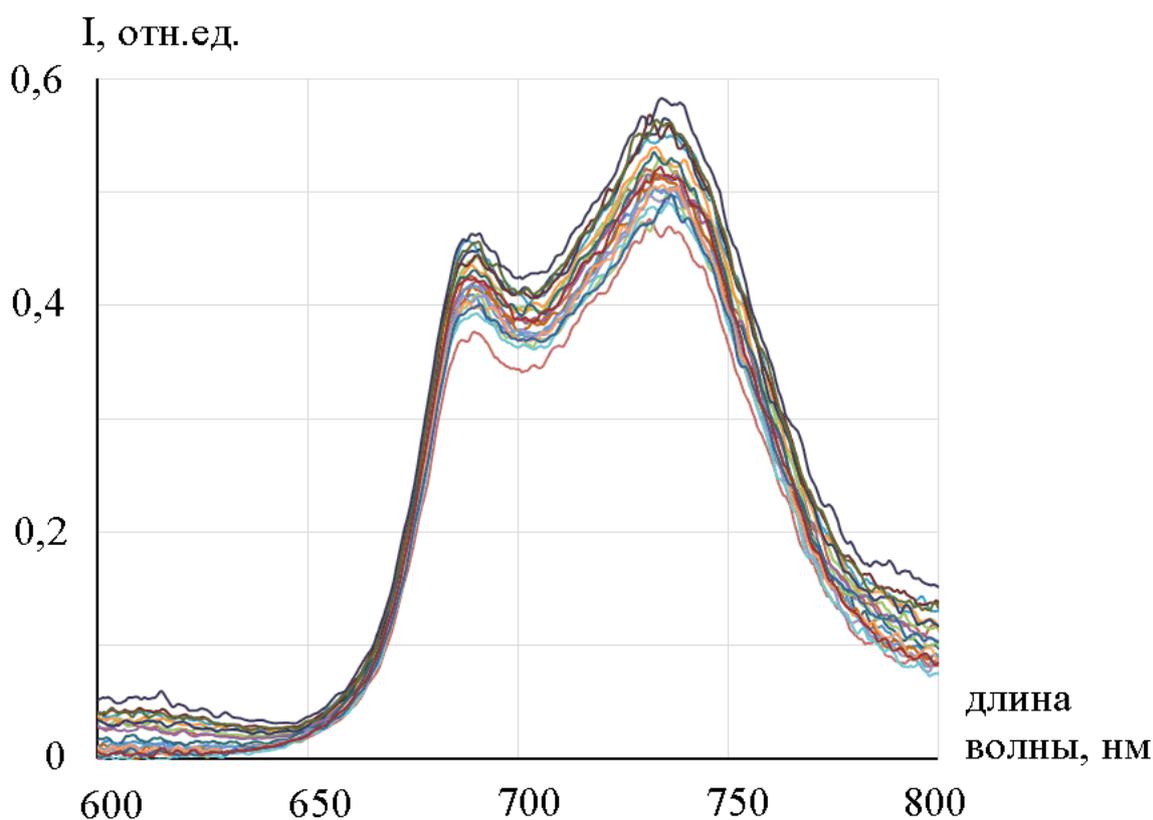


Рис.1. Спектры флуоресценции образца огуречной травы

Измерения проводились через две недели после посадки растения для одного и того же листа огуречной травы при неизменном положении измеряемого образца растения. Каждый раз измерения проводились через 2 минуты после включения лазера (для установления стабильного режима излучения лазера), после снятия спектра лазер выключался.

На рисунке 1 хорошо видно, что спектр флуоресценции растений в нормальном состоянии имеет два максимума – в области $\sim 680\dots 690$ нм и в области $\sim 735\dots 740$ нм.

Для характеристики спектров флуоресценции растений часто используют параметр R , равный отношению интенсивностей флуоресценции в узких спектральных диапазонах (их ширина в разных работах может быть разной) на двух длинах волн (одна длина волны в области $\sim 680\dots 690$ нм, а другая - в области $\sim 735\dots 740$ нм.).

На рисунке 2 показана (для спектров на рисунке 1) величина отношения R интенсивностей флуоресценции в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 680 и 740 нм в зависимости от номера спектра i .

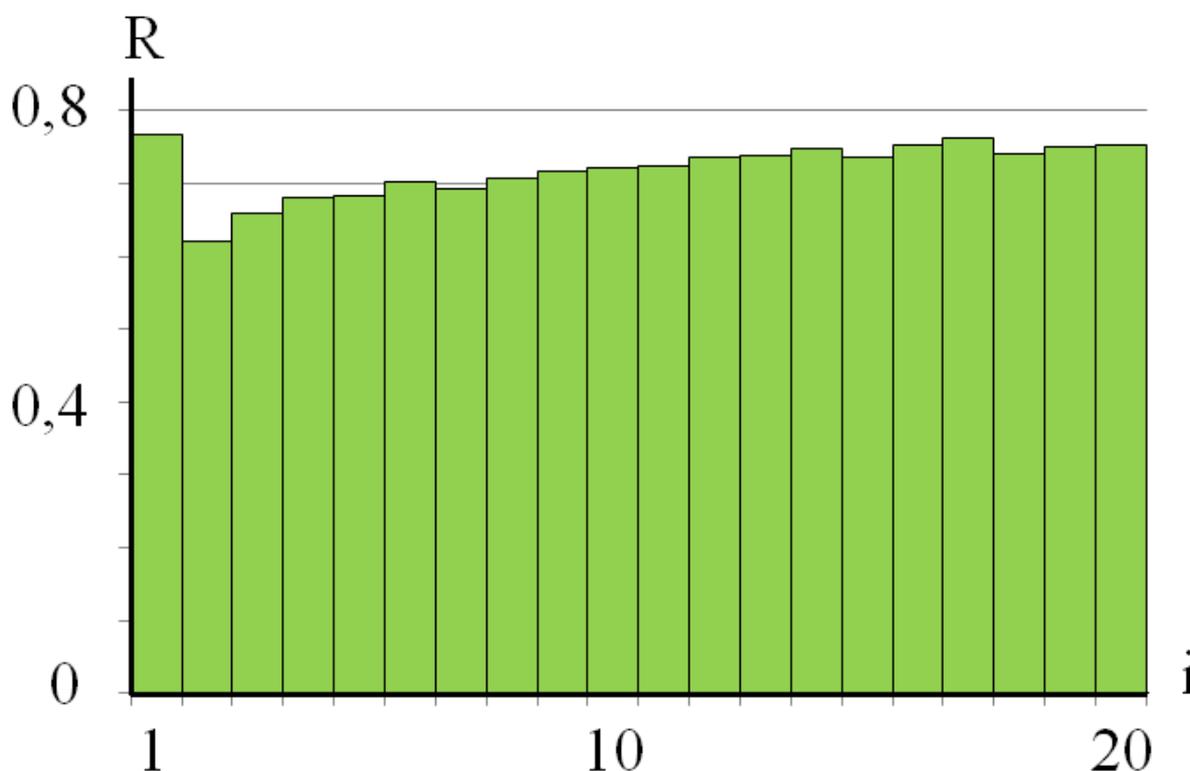


Рис.2. Величина отношения R для спектров флуоресценции образца огуречной травы

Среднее значение отношения R для спектров на рисунках 1,2 – 0,719, стандартное отклонение по выборке – 0,038 (5,3% от среднего значения).

На рисунке 3 представлены результаты измерений для разных образцов одного и того же вида растения. Здесь показаны спектры флуоресценции 11 разных образцов горчицы, посаженных в одно и то же время.

Для проведения измерений (через две недели после посадки растений) образцы ставились так, чтобы лазерное пятно попадало на листья образца горчицы, которые находятся приблизительно на одной высоте, и не попадало на грунт (в который посажены растения).

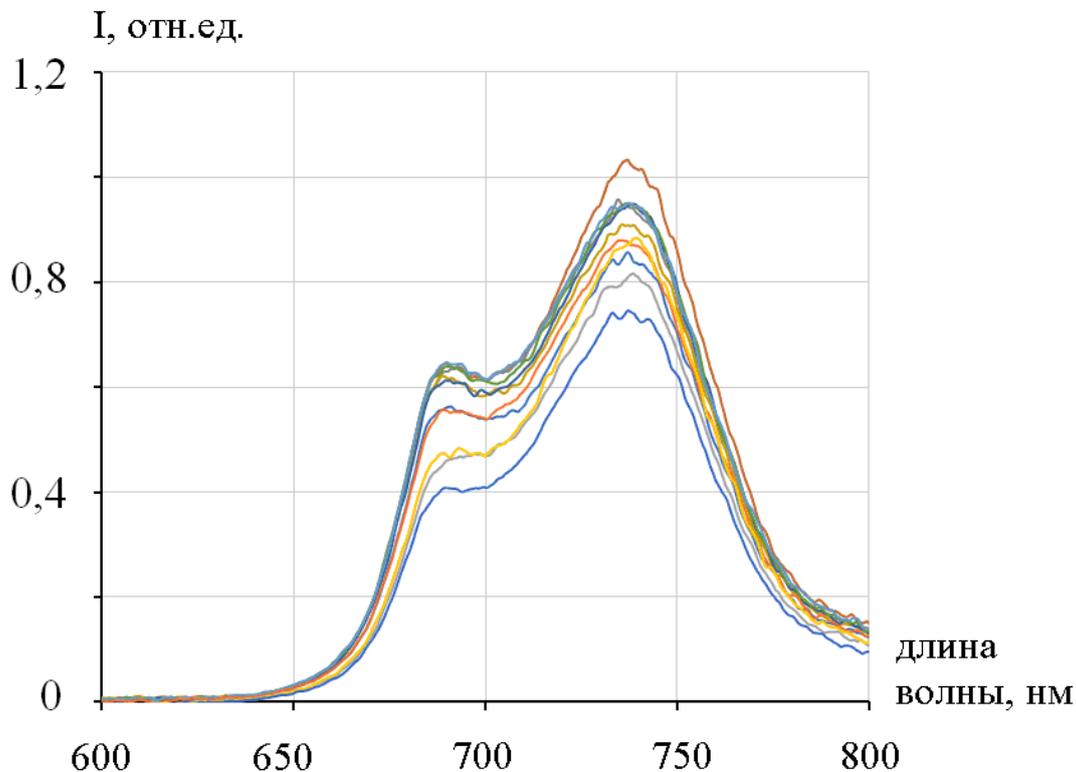


Рис.3. Спектры флуоресценции разных образцов горчицы через две недели после посадки растений

На рисунке 4 показана (для спектров, приведенных на рисунке 3) величина отношения R интенсивностей флуоресценции в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 680 и 740 нм в зависимости от номера спектра i .

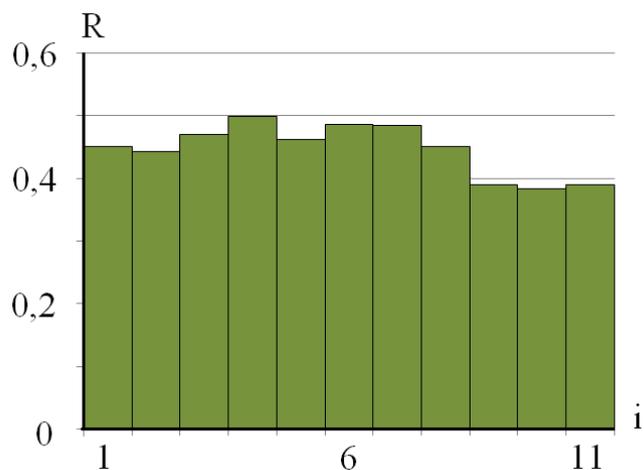


Рис.4. Величина отношения R для спектров флуоресценции разных образцов горчицы через две недели после посадки растений

Среднее значение отношения R для спектров на рисунках 3,4 – 0,446, стандартное отклонение – 0,041 (9,2% от среднего значения).

На рисунках 5,6 представлены результаты измерений (аналогичные показанным на рисунках 3,4) для 6 образцов горчицы, но измеренные через одну неделю после посадки.

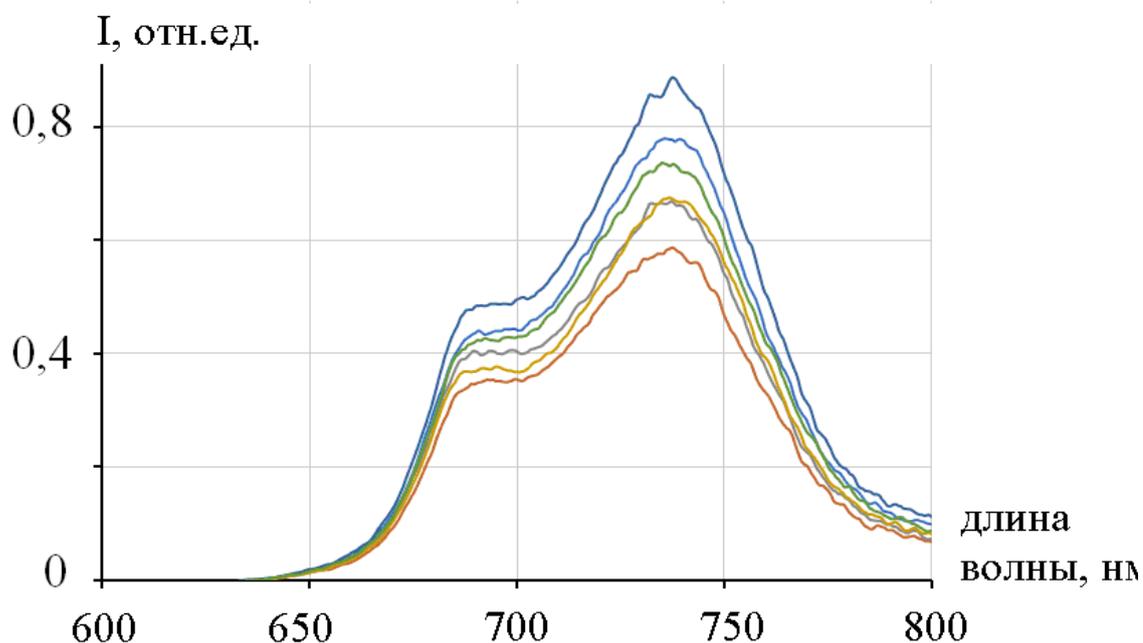


Рис.5. Спектры флуоресценции разных образцов горчицы через одну неделю после посадки растений

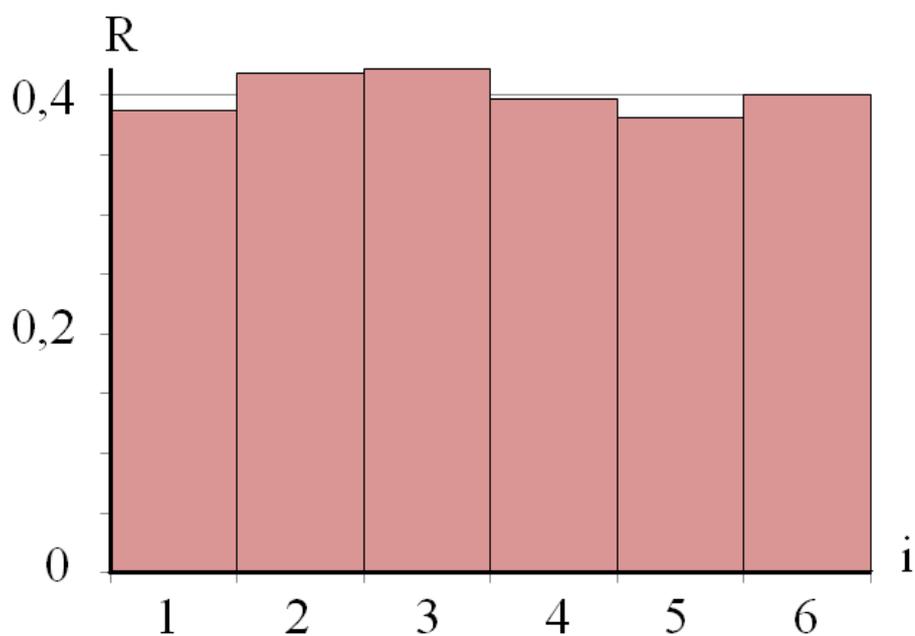


Рис.6. Величина отношения R для спектров флуоресценции разных образцов горчицы через одну неделю после посадки растений

Среднее значение отношения R для спектров на рисунках 5,6 – 0,4, стандартное отклонение – 0,0164 (4,1% от среднего значения). Из рисунков 3,4 и 5,6 видно, что спектры флуоресценции горчицы немного зависят от стадии вегетации.

На рисунках 7 - 11 представлены результаты измерений для отношения R интенсивностей флуоресценции в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 680 и 740 нм для ряда других растений. На рисунке 7 – для 11 образцов кресс-салата, измеренные через 2,5 месяца после посадки. На рисунке 8 - для 6 образцов огурца апрельского, измеренные через 3 месяца после посадки. На рисунке 9 – для 6 образцов огурца Берендея, измеренные через 2 месяца после посадки. На рисунках 10,11 – для травы из газонной смеси Декора Agos.

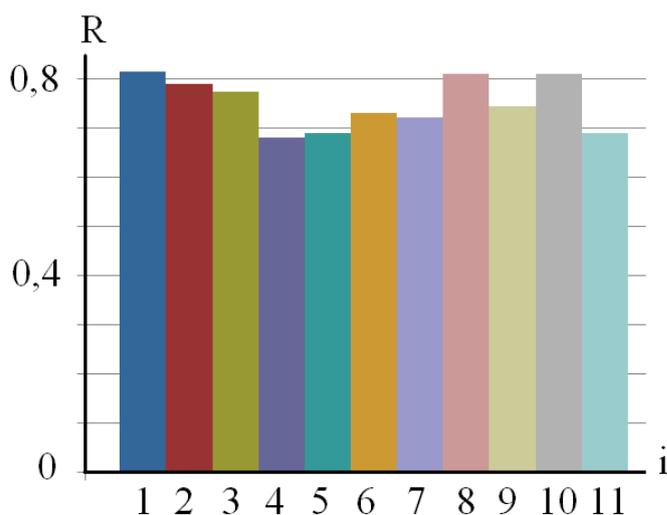


Рис.7. Величина отношения R для спектров флуоресценции разных образцов кресс-салата

Среднее значение отношения R для спектров на рисунке 7 – 0,75, стандартное отклонение – 0,052 (6,9% от среднего значения).

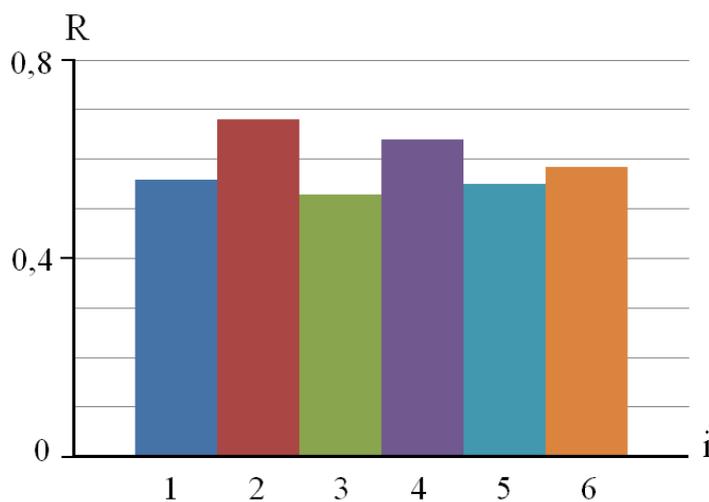


Рис.8. Величина отношения R для спектров флуоресценции разных образцов огурца апрельского

Среднее значение отношения R для спектров на рисунке 7 – 0,59, стандартное отклонение – 0,058 (9,8% от среднего значения).

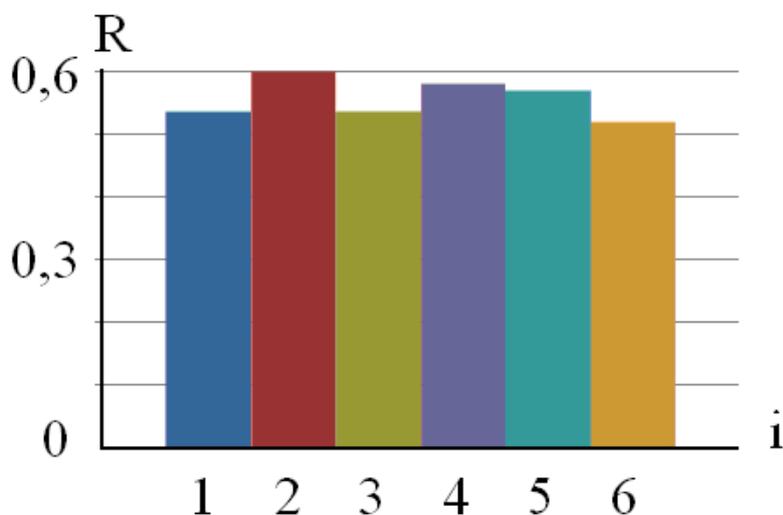


Рис.9. Величина отношения R для спектров флуоресценции разных образцов огурца Берендея

Среднее значение отношения R для спектров на рисунке 11 – 0,56, стандартное отклонение – 0,03 (5,4% от среднего значения).

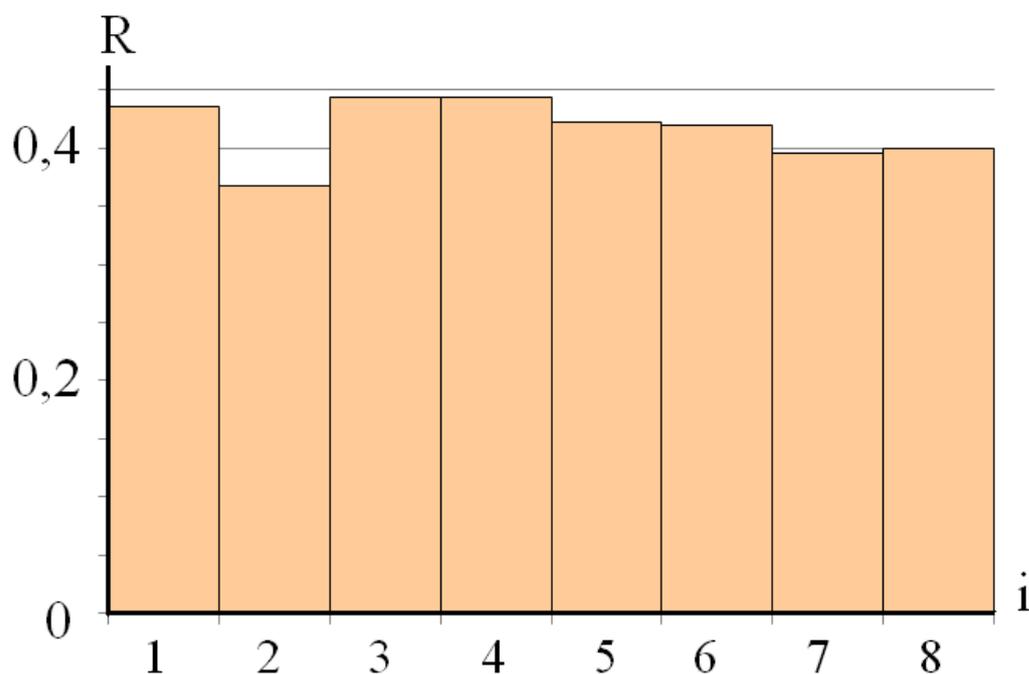


Рис.10. Величина отношения R для спектров флуоресценции для разных измерений газонной смеси Декора Agros через 2,5 недели после посадки

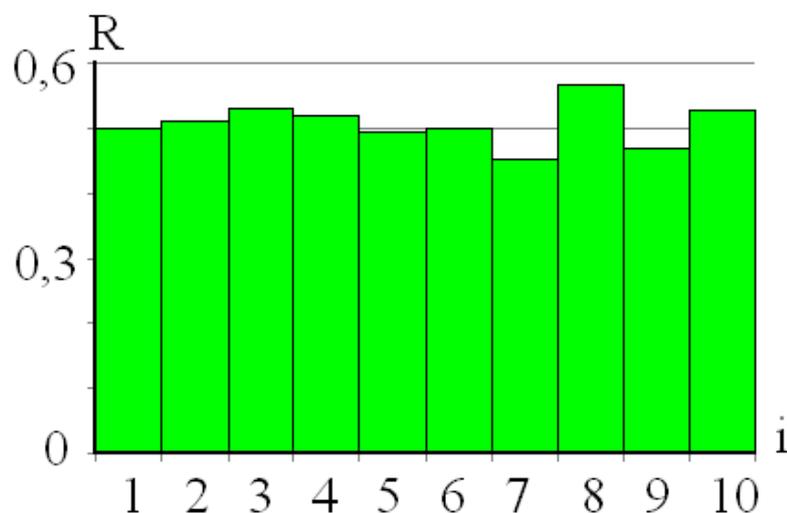


Рис.11. Величина отношения R для спектров флуоресценции для разных измерений газонной смеси Декора Aros через 3,5 недели после посадки

Среднее значение отношения R для спектров на рисунке 9 – 0,42, стандартное отклонение – 0,027 (6,4% от среднего значения). Среднее значение отношения R для спектров на рисунке 10 – 0,51, стандартное отклонение – 0,032 (6,3% от среднего значения).

Значение отношения R для экспериментальных спектров флуоресценции растений по работам других авторов приведены на рисунке 12. Здесь показано отношение R (в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 680 и 740 нм) для спектров листьев растений и лиственных деревьев (для растений в нормальном состоянии и верхней стороны листьев) при длине волны возбуждения около 532 нм по данным [1,12-18]. Каждая точка на рисунке соответствует спектру одного растения; i - номер растения в базе данных: 1,2 – алоэ; 3 – фасоль; 4-9,12,13 – береза; 10,14 – черная вишня; 11,15 – колосняк мягкий (Dune Grass); 16,17 – кукуруза; 18 – апельсиновое дерево; 19,23 – тополь; 20-22 – пальма; 24-26 – традесканция (Tradescantia); 27 – восковник (Wax Murtle); 28-30 – спатифиллум (Spatifilium). Семь последних точек на рисунке (31-37) соответствуют средним значениям отношения R по нашим (приведенным выше) данным измерений.

Для данных приведенных на рисунке 12 среднее значение отношения R равно 0,449, стандартное отклонение по выборке - 0,156 только по данным [1,12-18]. Если учесть и наши данные измерений, то среднее значение отношения R равно 0,48, а стандартное отклонение по выборке - 0,16.

Экспериментальных данных, посвященных исследованию спектров флуоресценции листьев растений и лиственных деревьев одновременно как в нормальном, так и стрессовом состояниях для длины волны возбуждения 532 нм, очень мало (см., например [1,17]). Анализ этих работ и данных измерений авторов показывает, что для стрессового состоя-

ния конкретных растений величина отношения R превышает отношение R для растений в нормальном состоянии на 0,1 и более.

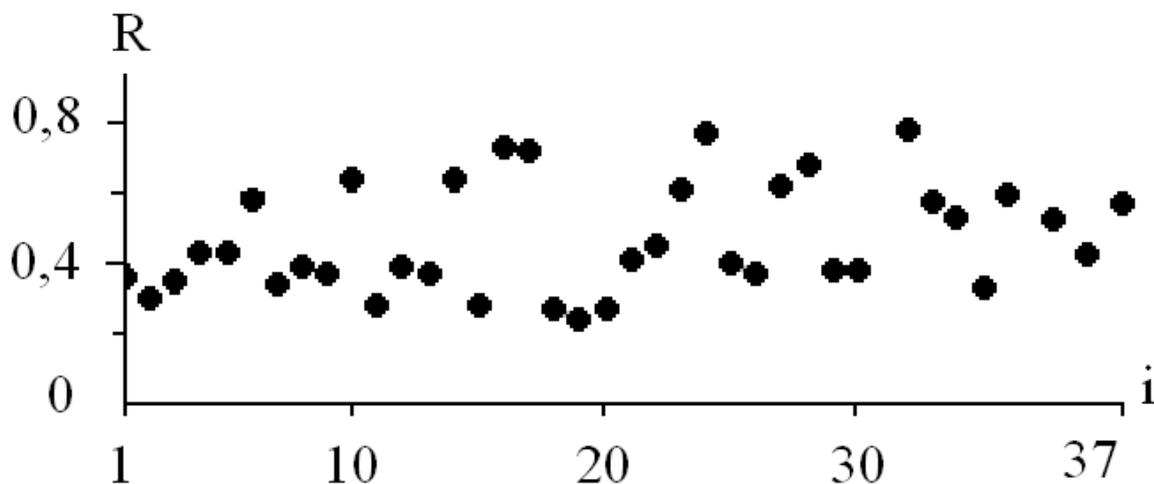


Рис.12. Величина отношения R для спектров флуоресценции разных растений по данным [1,12-18] и по нашим данным измерений

Таким образом, результаты обработки экспериментально измеренных авторами спектров флуоресценции растений и анализ имеющихся данных показывают:

- спектры флуоресценции разных образцов одного и того же растения выращенные в похожих условиях (и измеренные в один день примерно в тоже время дня) и одного образца растения в течение дня показывают хорошую повторяемость формы спектров. Высокую стабильность имеет величина отношения R интенсивности флуоресценции на длине волны 680 нм к интенсивности флуоресценции на длине волны 740 нм. Стандартное отклонение по выборке отношения R для разных образцов одного и того же растения и одного образца растения в течение дня (для ширины спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения 10 нм) лежит в диапазоне $\sim 0,016$ - $\sim 0,06$.

- различие между собой спектров флуоресценции разных растений существенно больше, чем различие спектров флуоресценции разных образцов одного и того же растения. Стандартное отклонение по выборке отношения R для разных растений (для ширины спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения 10 нм) имеет величину $\sim 0,16$.

- различие между собой спектров флуоресценции одного вида растений в нормальном и стрессовом состояниях существенно больше, чем различие спектров флуоресценции разных образцов одного и того же растения. Для стрессового состояния конкретных растений величина отношения R превышает отношение R для растений в нормальном состоянии на величину в диапазоне $\sim 0,1$ - $\sim 0,4$.

Таким образом, экспериментальные измерения показывают, что величина отношения R интенсивности флуоресценции на длине волны 680 нм к интенсивности флуоресценции на длине волны 740 нм характеризуется высокой стабильностью. Разброс величины отношения R разных образцов одного и того же растения выращенных в похожих условиях и одного образца растения в течение дня существенно меньше различия между собой отношения R разных растений и различия отношения R для одного вида растения в нормальном и стрессовом состояниях.

Это позволяет в перспективе создать лазерную систему для рутинного мониторинга состояния растений. При этом для надежности измерений (уменьшении вероятности ложных тревог) необходимо предварительное измерение используемого параметра R для образцов конкретного вида контролируемых растений как в нормальном, так и в стрессовом состояниях.

Заключение

Для разных образцов одного и того же растения, выращенных в похожих условиях (и измеренных в один день примерно в то же время дня), и одного образца растения в течение дня величина отношения интенсивности флуоресценции на длине волны 680 нм к интенсивности флуоресценции на длине волны 740 нм характеризуется высокой стабильностью и может быть использована для контроля состояния растений.

Список литературы

1. 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.
2. Cecchi G., Bazzani M., Pantani L., Mazzinghi P., Raimondi V. Fluorescence lidar remote sensing of vegetation // *Proc. of SPIE*. 1995. Vol. 2585. P. 48-56. DOI: [10.1117/12.227168](https://doi.org/10.1117/12.227168)
3. Chappelle E.W., Wood F.M., McMurtrey III J.E., Newcomb W.W. Laser-induced fluorescence of green plants. 1: A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation // *Applied Optics*. 1984. Vol. 23, no. 1. P. 134-138.
4. Chappelle E.W., McMurtrey III J.E., Wood F.M., Newcomb W.W. Laser-induced fluorescence of green plants. 2: LIF caused by nutrient deficiencies in corn // *Applied Optics*. 1984. Vol. 23, no. 1. P. 139-142.
5. Fateeva N.L., Matvienko G.G. Application of the method of laser-induced fluorescence // *Proc. of SPIE*. 2004. Vol. 5232. P. 652-657. DOI: [10.1117/12.511434](https://doi.org/10.1117/12.511434)
6. Matvienko G., Timofeev V., Grishin A., Fateyeva N. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation // *Proc. of SPIE*. 2006. Vol. 6367. P. 63670F-1 - 63670F-8. DOI: [10.1117/12.689612](https://doi.org/10.1117/12.689612)

7. 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.
8. Исследование лазерно-индуцированной флуоресценции хвойных и лиственных растений при азотном загрязнении почвы / Н.Л. Фатеева, А.В. Клишкин, О.В. Бендер, А.П. Зотикова, М.С. Ямбургов // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19, № 2-3. С. 212-215.
9. Barbini R., Colao F., Fantom R., Palucci F., Ribezzo S. Laser remote monitoring of the plant photosynthetic // *Proc. of SPIE*. 1995. Vol. 2585. P. 57-65. DOI: [10.1117/12.227169](https://doi.org/10.1117/12.227169)
10. Luedeker W., Guenther K.P., Dahn H.-G. Laser-induced leaf fluorescence: a tool for vegetation status and stress monitoring and optical-aided agriculture // *Proc. of SPIE*. 1997. Vol. 3059. P. 63-75. DOI: [10.1117/12.277619](https://doi.org/10.1117/12.277619)
11. 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. P. 155-159.
12. 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. P. 470-479.
13. Hoge F.E., Swift R. N., Yungel J. K. Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plants // *Applied Optics*. 1983. Vol. 22, no. 19. P. 2991-3000.
14. Бункин А.Ф., Бункин Ф.В. Лидарное зондирование водоемов, почвы и растительности // *Оптика атмосферы и океана*. 2000. Т. 13, № 1. С. 63-69.
15. Hristov H.A., Borisova E.G., Avramov L.A., Kolev I.N. Applications of laser-induced fluorescence for remote sensing // *Proc. of SPIE*. 2001. Vol. 4397. P. 496 - 500. DOI: [10.1117/12.425192](https://doi.org/10.1117/12.425192)
16. 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.
17. Middleton E., McMurtrey J.E., Entcheva Campbell P.K., Corp L.A., Butchera L.M., Chappelle E.W. Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes // *Proc. of SPIE*. 2003. Vol. 4879. P. 72-83. DOI: [10.1117/12.463087](https://doi.org/10.1117/12.463087)

18. 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 // Applied Optics. 2002. Vol. 41, no. 3. P. 401-406.

Analysis of Laser-Induced Fluorescence Spectra Stability of Plants

07, July 2014

DOI: 10.7463/0714.0718315

Yu.V. Fedotov¹, O.A. Bullo¹, M.L. Belov^{1,a}, V.A. Gorodnichev¹

¹Bauman Moscow State Technical University,
105005, Moscow, Russian Federation

^abelov@bmstu.ru

Keywords: [plant](#), [laser method](#), [laser induced fluorescence](#), [spectra](#), [stability](#)

Existence of pollutants in the soil, an insufficient amount of water and nutrients lead to stressful situations for plants thereby making their normal growth impossible. It is difficult to identify stressful situations at early stages from appearance of plants. Therefore development of methods and devices for detection of stressful states is of importance.

One of promising methods to detect the stressful conditions of plants is laser induced fluorescence method.

In spite of the great number of works, which present research results of vegetation fluorescence spectra, a question on the spectra form stability seems to be unclear.

The paper shows an experiment-based study of the fluorescence spectra stability of plants for the excitement wavelength of 0.532 microns.

Results from the processing of fluorescence spectra of plants are as follows:

- fluorescence spectra of different samples of the same plant and one sample of a plant throughout the day show good repeatability of the spectra form. The highly stable is a ratio R value of the fluorescence intensity at the wavelength of 680 nanometers to the fluorescence intensity at the wavelength of 740 nanometers. The standard deviation of the ratio R for different samples of the same plant and one sample of a plant through the day is within the range ~ 0.016 - ~ 0.06.

- distinction between the fluorescence spectra of different plants among themselves is significantly more than distinction of the fluorescence spectra of different samples of the same plant. The standard deviation value of the ratio R for different plants is ~ 0,16.

References

1. 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, pp. 1922-1926.
2. Cecchi G., Bazzani M., Pantani L., Mazzinghi P., Raimondi V. Fluorescence lidar remote sensing of vegetation. *Proc. of SPIE*, 1995, vol. 2585, pp. 48-56. DOI: [10.1117/12.227168](https://doi.org/10.1117/12.227168)
3. Chappelle E.W., Wood F.M., McMurtrey III J.E., Newcomb W.W. Laser-induced fluorescence of green plants. 1: A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation. *Applied Optics*, 1984, vol. 23, no. 1, pp. 134-138.
4. Chappelle E.W., McMurtrey III J.E., Wood F.M., Newcomb W.W. Laser-induced fluorescence of green plants. 2: LIF caused by nutrient deficiencies in corn. *Applied Optics*, 1984, vol. 23, no. 1, pp. 139-142.
5. Fateeva N.L., Matvienko G.G. Application of the method of laser-induced fluorescence. *Proc. of SPIE*, 2004, vol. 5232, pp. 652-657. DOI: [10.1117/12.511434](https://doi.org/10.1117/12.511434)
6. Matvienko G., Timofeev V., Grishin A., Fateyeva N. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6367, pp. 63670F-1 - 63670F-8. DOI: [10.1117/12.689612](https://doi.org/10.1117/12.689612)
7. 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, pp. 746-749.
8. Fateyeva N.L., Klimkin A.V., Bender O.V., Zotikova A.P., Yamburov M.S. Analysis of laser-induced fluorescence in wood plants under nitrogen soil pollution. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and oceanic optics*, 2006, vol. 19, no. 2-3, pp. 189-192. (in Russian).
9. Barbini R., Colao F., Fantom R., Palucci F., Ribezzo S. Laser remote monitoring of the plant photosynthetic. *Proc. of SPIE*, 1995, vol. 2585, pp. 57-65. DOI: [10.1117/12.227169](https://doi.org/10.1117/12.227169)
10. Luedeker W., Guenther K.P., Dahn H.-G. Laser-induced leaf fluorescence: a tool for vegetation status and stress monitoring and optical-aided agriculture. *Proc. of SPIE*, 1997, vol. 3059, pp. 63-75. DOI: [10.1117/12.277619](https://doi.org/10.1117/12.277619)
11. 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.

12. 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.
13. Hoge F.E., Swift R. N., Yungel J. K. Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plants. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 19, pp. 2991-3000.
14. Bunkin A.F., Bunkin F.V. Lidar sensing of water, ground, and plant surfaces. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and oceanic optics*, 2000, vol. 13, no. 1, pp. 54-60. (in Russian).
15. Hristov H.A., Borisova E.G., Avramov L.A., Kolev I.N. Applications of laser-induced fluorescence for remote sensing. *Proc. of SPIE*, 2001, vol. 4397, pp. 496 - 500. DOI: [10.1117/12.425192](https://doi.org/10.1117/12.425192)
16. Afonasenko 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).
17. Middleton E., McMurtrey J.E., Entcheva Campbell P.K., Corp L.A., Butchera L.M., Chappelle 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](https://doi.org/10.1117/12.463087)
18. 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. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 3, pp. 401-406.