

Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2018. № 04. С. 1–13

DOI: [10.24108/rdeng.0418.0000139](https://doi.org/10.24108/rdeng.0418.0000139)

Представлена в редакцию: 08.06.2018

© НП «НЕИКОН»

УДК 504.064.36

Трехспектральный лазерный метод контроля состояния растительного покрова

Белов М.Л.^{1,*}, Белов А.М.¹,

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

Городничев В.А.¹, Кувшинов А.В.¹

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

Проведено исследование эффективности работы дистанционного лазерного трехспектрального метода контроля состояния растительного покрова, использующего безопасные для зрения длины волн лазерного излучения в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах. Статистическое моделирование с использованием спектральных зависимостей коэффициентов отражения растений показывает, что трехспектральный лазерный метод может быть положен в основу мониторинга состояния растительного покрова. Дистанционное лазерное зондирование на длинах волн 0,355, 1,54 и 2 мкм дает возможность обнаруживать участки растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях, с вероятностью ложных тревог ~ десятых и сотых долей и вероятностью правильного обнаружения близкой к 1.

Ключевые слова: лазерный метод, коэффициенты отражения, контроль растительности

Введение

Контроль состояния растительного покрова является одной из важных задач лазерного дистанционного зондирования.

Наиболее перспективным методом дистанционного зондирования растительного покрова является метод лазерно-индуцированной флуоресценции (см., например, [1-4]). Однако, в настоящее время дальность зондирования флуоресцентных лидаров обычно ~ 100 м или немногим более.

Альтернативным методом дистанционного контроля состояния растительного покрова является метод, основанный на регистрации излучения, отраженного от участка с растительностью. Спектральный анализ излучения отраженного от участка с растительностью позволяет получить информацию о состоянии растительного покрова (см., например, [5-10]). Однако, на сегодняшний день такие методы являются пассивными со всеми недостатками присущими пассивным системам и прежде всего невозможностью работать в сумерках и в ночных условиях.

Одним из вариантов аппаратуры, позволяющей в широком диапазоне погодных условий и независимо от времени суток проводить оперативный контроль состояния растительного покрова, является лазерная система дистанционного зондирования (например, авиационного базирования), которая проводит спектральный анализ излучения, отраженного от земной поверхности.

Статья посвящена разработке нового лазерного метода контроля состояния растительного покрова, основанного на зондировании земной поверхности на трех длинах волн излучения.

1. Постановка задачи

Схема лазерного дистанционного зондирования земной поверхности с авиационного носителя показана на рис.1.

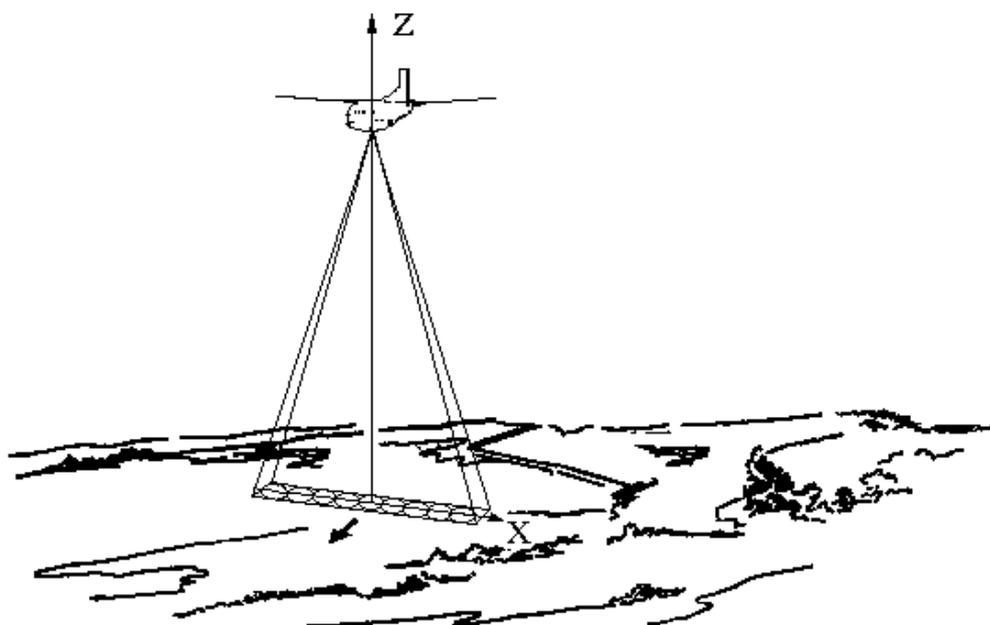


Рис.1. Схема лазерного дистанционного зондирования земной поверхности с авиационного носителя

Лазерный локатор, расположенный на авиационном носителе, облучает земную поверхность. При этом, полоса обзора на земной поверхности обычно формируется за счет углового сканирования лазерного пучка в плоскости, перпендикулярной направлению полета носителя.

Примеры спектров отражения растительности, находящейся в нормальных для развития условиях (в нормальном состоянии) и в условиях неблагоприятных для развития показаны на рисунке 2 [7]. Здесь приведены спектры отражения листьев фасоли для разных причин неблагоприятных условий. Обозначения на рисунке 2: 1 – растение в нормальных условиях, 2 – растение через 2 недели после внесения в почву нефтяного загрязнения, 3 – растение через 2 недели после залива почвы большим количеством воды (забо-

лачивание почвы), 4 – растение через 2 недели после одновременного заболачивания почвы и ее нефтяного загрязнения.

Из рисунка видно, что в нормальных для развития условиях зеленая растительность имеет максимум в спектре отражения (в зеленой области спектра ~ 0,52 - 0,58 мкм). В ближней инфракрасной спектральной области (в области спектра более 0,75 мкм) отражательная способность зеленых растений, находящихся в нормальных для развития условиях, достигает максимума.

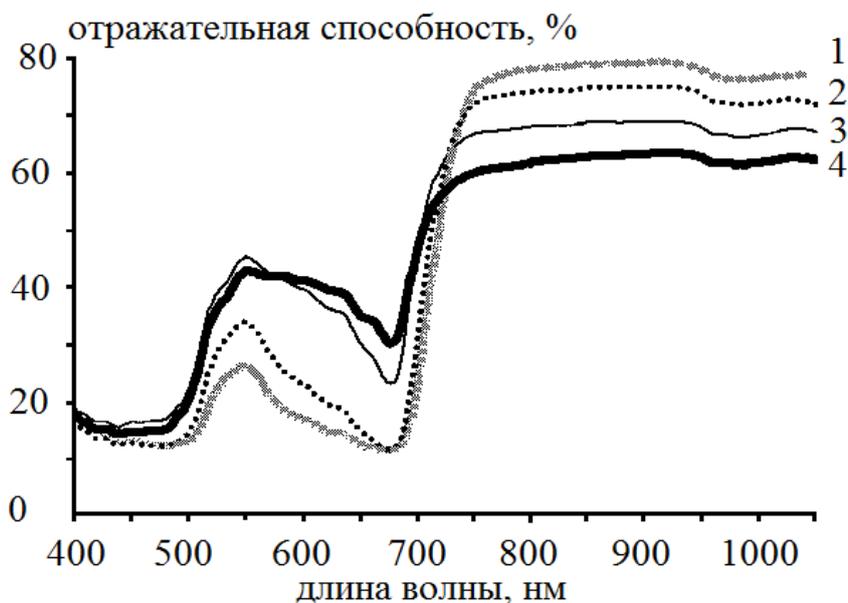


Рис. 2. Спектральная зависимость отражательной способности листьев фасоли

В условиях неблагоприятных для развития растений (например, в условиях заболачивания почвы или нефтяных загрязнений) спектральная зависимость отражательной способности растений искажается – при переходе к ближней инфракрасной спектральной области происходит уменьшение «перепада» отражательной способности растений и заметно сглаживается максимум в зеленой спектральной области.

Для оценки состояния растительного покрова по данным пассивного оптического мониторинга (с авиационного носителя или с ИСЗ) используют специальные комплексные параметры, называемые индексами вегетации (см., например, [5,8,10]). Использование индексов вегетации базируется на различиях отражательной способности растительного покрова в видимом и ближнем (менее 1,4 мкм) инфракрасном диапазонах спектра.

Однако, использование видимого и ближнего (менее 1,4 мкм) инфракрасного диапазона спектра для активных систем лазерного дистанционного зондирования связано с опасностью для зрения людей.

Лазерное излучение в спектральных диапазонах 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм оказывает воздействие на передние среды глаза и является значительно более безопасным,

чем лазерное излучение в спектральном диапазоне 0,38 – 1,4 мкм, которое оказывает воздействие на сетчатку глаза [11].

Таким образом, требование безопасности для глаз приводит к необходимости использования для перспективных лазерных систем дистанционного зондирования длин волн излучения в спектральных диапазонах 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм.

Ниже проводится обоснование выбора безопасных для зрения длин волн зондирования для лазерного метода контроля состояния растительного покрова.

2. Выбор безопасных для зрения длин волн зондирования растительного покрова

Для более безопасных для зрения (по сравнению со спектральным диапазоном 0,38 – 1,4 мкм) лазерных длин волн в спектральных диапазонах 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм различия в отражательной способности растений, находящихся в нормальных условиях и в условиях неблагоприятных для развития, не очевидны.

Анализ возможности использования спектральных диапазонов 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм для зондирования растительного покрова проводился на основе существующих в настоящее время спектральных библиотек коэффициентов отражения растительности. В настоящей работе были использованы данные о коэффициентах отражения растительности из спектральной библиотеки [12].

В спектральном диапазоне 0,18 – 0,38 мкм из-за сильного поглощения кислородом и озоном (в коротковолновой части этого диапазона) наиболее перспективной для бортовой аппаратуры является длина волны лазерного зондирования 0,355 мкм (третья гармоника твердотельного ИАГ-лазера с легированием неодимом).

В диапазоне свыше 1,4 мкм из-за сильного поглощения парами воды и двуокисью углерода наиболее перспективные длины волн лазерного зондирования ограничены окнами прозрачности земной атмосферы 1,5-1,8 мкм и 2-2,4 мкм (лазеры на эрбиевом стекле, оптические параметрические генераторы, лазеры на ИАГ с легированием гольмием).

Математическое моделирование с использованием данных спектральной библиотеки [12] показывает, что одним из вариантов выбора лазерных длин волн, лежащих в безопасных для зрения спектральных диапазонах, являются длины волн 0,355, 1,54 и 2 мкм.

В качестве информационных индексов (характеризующих состояние растительности - растение в нормальных условиях или в неблагоприятных для развития условиях) было взято отношение

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})}$$

коэффициентов отражения на длинах волн 2 и 0,355 мкм и отношение

$$\frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$$

коэффициентов отражения на длинах волн 1,54 и 2 мкм .

На Рис.3, 4 показаны результаты обработки спектров отражения растений из спектральной библиотеки [12], для которых имеются данные как в УФ, так и в ближней ИК областях спектра. Здесь по вертикальной оси отложены значения отношения

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})} \text{ и } \frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})},$$

соответственно, а по горизонтальной оси – номер i спектра отражения растений в созданной базе данных (см. табл.1).

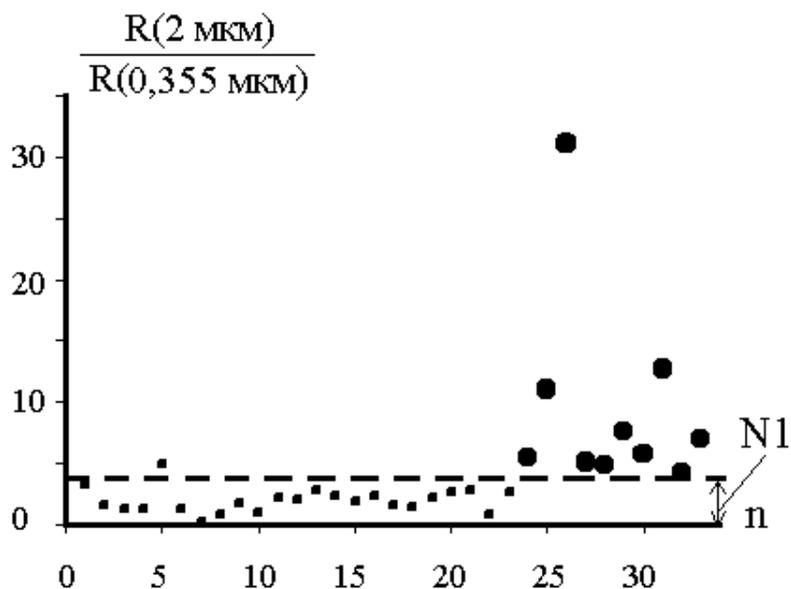


Рис 3. Отношения $\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})}$ для спектров из спектральной библиотеки

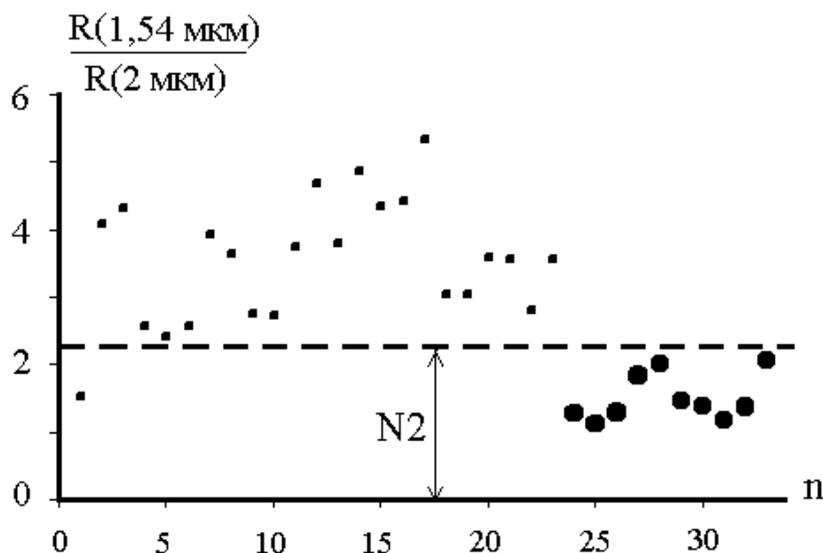


Рис 4. Отношения $\frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$ для спектров из спектральной библиотеки

Таблица 1. Описание растений из созданной базы данных

| Номер спектра | Растение | Номер спектра | Растение |
|---------------|---|---------------|--|
| 1 | полынь обыкновенная | 18 | сосна скрученная широкохвойная |
| 2 | осина | 19 | ореховое дерево |
| 3 | осина , с другого участка | 20 | газонная трава |
| 4 | дуб | 21 | газонная трава |
| 5 | лох узколистный | 22 | ива |
| 6 | лебеда | 23 | клён |
| 7 | ель голубая | 24 | полынь обыкновенная , сухие листья |
| 8 | энгельманова ель | 25 | сухая трава |
| 9 | пихта | 26 | дуб , сухой лист |
| 10 | можжевельник виргинский | 27 | молочай, октябрь, с 1-го участка, листья и стебли в основном оранжевые |
| 11 | молочай, июнь, с 1-го участка | 28 | молочай, октябрь, с 3-го участка, увядающие листья и стебли в основном красные |
| 12 | молочай, июль, с 1-го участка | 29 | молочай, октябрь, с 6-го участка, увядающие листья и стебли в основном оранжевые |
| 13 | молочай, сентябрь, с 1-го участка | 30 | сосна скрученная широкохвойная, сухие иголки |
| 14 | молочай, июнь, с 2-го участка | 31 | сосна скрученная широкохвойная , сухие, коричневые иголки |
| 15 | молочай, июль, с 3-го участка | 32 | сухая высокая трава |
| 16 | молочай, июль, с 4-го участка | 33 | ива , сухие листья |
| 17 | молочай, июль, с 5-го участка | | |

Данные с номерами 1 – 23 на рис. 3 и 4 и в табл. 1 относятся к растениям, находящимся в нормальных условиях - зеленой траве и растениям с живыми зелеными листьями (или иглами для хвойных деревьев). Данных с номерами 24 – 33 относятся к растениям, находящимся в неблагоприятных для развития условиях (или в соответствующий увяданию период вегетации) - сухой траве и растениям с увядающими листьями или к сухим листьям (или иглам для хвойных деревьев).

Из Рис. 3,4 видно, что величина информационных индексов

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})} \text{ и } \frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$$

существенно зависит от состояния растений.

Значения информационного индекса

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})}$$

для зеленых растения в нормальных условиях всегда меньше, чем значения этого информационного индекса для сухих растений, растений в осенний период и т.п.

Значения информационного индекса

$$\frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$$

для зеленых растения всегда больше, чем значения информационного индекса для сухих растений, растений в осенний период и т.п.

При этом, для обнаружения (из данных измерений коэффициентов отражения на длинах волн 0,355, 1,54 и 2 мкм) участков растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях может быть использован пороговый алгоритм, использующий длины волн 0,355 и 2 мкм или 1,54 и 2 мкм:

для длин волн 0,355 и 2 мкм

если

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})} > N1,$$

то это участки растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях;

для длин волн 1,54 и 2 мкм

если

$$\frac{R(1,54\text{мкм})}{R(2\text{мкм})} < N2,$$

то это участки растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях.

Здесь $N1$, $N2$ - пороговые значения.

Значения $N1$, $N2$ выбирают по данным спектральных библиотек – по массивам априорных данных коэффициентов отражения растений, находящихся в нормальных для развития условиях и в условиях неблагоприятных для развития.

Процедура выбора порога для

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})}$$

заклучалась в определении верхней грани массива априорных данных для растительности, находящейся в нормальных для развития условиях, и нижней грани массива априорных данных для растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях, и определения «расстояния» между этими гранями. Пороговое значение соответствовало половинному расстоянию между нижней и верхней гранями этих массивов данных (для растительности в нормальном состоянии и в неблагоприятных для развития условиях). Если нижняя грань одного массива оказывается ниже верхней грани другого массива данных, то отдельные данные (для определения порога) отбрасываются (спектр номер 5 на рисунке 3), чтобы нижняя грань (априорных данных для растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях) была выше верхней грани (априорных данных для растительности, находящейся в нормальных для развития условиях).

Процедура выбора порога для

$$\frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$$

была аналогичной.

Для используемой базы данных коэффициентов отражения растительности (для рисунков 3 и 4) - $N1=3,72$ $N1 = 3,73$ и $N2=2,24$.

Таким образом, выбор длин волн 0,355, 1,54 и 2 мкм, позволяет решить задачу контроля состояния растительного покрова с использованием активного дистанционного зондирования на безопасных для зрения лазерных длинах волн.

Для оценки вероятности правильного обнаружения (вероятности обнаружения участков растительности, находящейся в условиях неблагоприятных для развития) и вероятности ложных тревог (вероятности отнесение растительности, находящейся в нормальных для развития условиях, к растительности, находящейся в условиях неблагоприятных для развития) при выборе длин волн лазерного зондирования 0,355, 1,54 и 2 мкм проводилось математическое моделирование.

3. Результаты математического моделирования

Решение об обнаружении участков растительного покрова, находящегося в неблагоприятных для развития условиях, принималось, используя пороговый алгоритм, описанный выше.

Результаты математического моделирования, приведенные ниже, получены при следующих пороговых значениях информационного индекса: 3,72 для длин волн зондирования 2 и 0,355 мкм; 2,24 для длин волн зондирования 1,54; 2 мкм.

Статистическое моделирование проводилось по 10^5 реализаций шума измерения. Полагалось, что шум (при измерениях коэффициентов отражения) распределен по нормальному закону со средним значением равным нулю и с относительным (по отношению к средним значениям коэффициентов отражения) среднеквадратическим отклонением $\delta=1$ – 10 %.

Результаты математического моделирования вероятности правильного обнаружения P_d и вероятности ложных тревог P_a (средних по всем растениям из созданной базы данных) приведены в таблице 2 (для длин волн 2 и 0,355 мкм), таблице 3 (для длин волн 1,54 и 2 мкм) и таблице 4 (при совместном использовании длин волн лазерного зондирования 2; 0,355 мкм и 1,54; 2 мкм).

Из таблиц 2 и 3 и рисунков 3 и 4 видно, что в большинстве случаев вполне достаточно только одного информационного индекса:

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})} \text{ или } \frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$$

(уменьшение вероятности правильного обнаружения и увеличение вероятности ложных тревог дают только отдельные виды растений).

Однако для повышения надежности измерений лучше использовать два отношения коэффициентов отражения:

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})} \text{ и } \frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$$

и пороговый алгоритм обнаружения:

если

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})} > N1$$

или если

$$\frac{R(1,54\text{мкм})}{R(2\text{мкм})} < N2,$$

то это участки растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях.

Совместное использование двух отношений

$$\frac{R(2\text{мкм})}{R(0,355\text{мкм})} \text{ и } \frac{R(1,540\text{мкм})}{R(2\text{мкм})}$$

позволяет существенно уменьшить вероятность ложных тревог и одновременно увеличить вероятность правильного обнаружение (см. Таблицу 4).

Таблица 2. Вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для длин волн 0,355 и 2 мкм

| δ , % | Pd | Pa |
|--------------|-----------|-----------|
| 1 | 1,000 | 0,044 |
| 3 | 1,000 | 0,046 |
| 5 | 0,999 | 0,053 |
| 10 | 0,991 | 0,069 |

Таблица 3. Вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для длин волн 1,54 и 2 мкм

| δ , % | Pd | Pa |
|--------------|-----------|-----------|
| 1 | 1,000 | 0,044 |
| 3 | 0,997 | 0,045 |
| 5 | 0,987 | 0,052 |
| 10 | 0,951 | 0,074 |

Таблица 4. Вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для длин волн 0,355, 1,54 и 2 мкм

| δ , % | Pd | Pa |
|--------------|-----------|-----------|
| 1 | 1,000 | 0,000 |
| 3 | 1,000 | 0,006 |
| 5 | 1,000 | 0,015 |
| 10 | 1,000 | 0,025 |

Результаты Таблицы 4 показывают, что трехспектральный лазерный метод контроля состояния растительного покрова, использующий длины волн зондирования 0,355, 1,54 и 2 мкм, дает возможность с вероятностью правильного обнаружения близкой к 1 и вероят-

ностью ложных тревог ~ десятых и сотых долей проводить обнаружение участков растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях.

Заключение

Проведено исследование эффективности работы дистанционного лазерного трехспектрального метода контроля состояния растительного покрова, использующего безопасные для зрения длины волн лазерного излучения в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах. Статистическое моделирование с использованием спектральных зависимостей коэффициентов отражения растений показывает, что трехспектральный лазерный метод может быть положен в основу мониторинга состояния растительного покрова. Дистанционное лазерное зондирование на длинах волн 0,355, 1,54 и 2 мкм дает возможность обнаруживать участки растительности, находящейся в неблагоприятных для развития условиях, с вероятностью ложных тревог ~ десятых и сотых долей и вероятностью правильного обнаружения близкой к 1.

Список литературы

1. Fedotov Yu.V., Belov M.L., Bullo O.A., Gorodnichev V.A. Experimental research of different factors influencing on stability of laser induced fluorescence spectra of plants // Proc. of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2017. Vol. 10466. Pp. 10466R-1 – 10466R-5. DOI: [10.1117/12.2285291](https://doi.org/10.1117/12.2285291)
2. 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)
3. Kazunori Saito. Plant and vegetation monitoring using laser-induced fluorescence spectroscopy // Industrial applications of laser remote sensing / Tetsuo Fukuchi, Tetsuo Shiina. Saif Zone; Oak Park: Bentham Science Publ., 2012. Pp. 99-114. DOI: [10.2174/978160805340711201010099](https://doi.org/10.2174/978160805340711201010099)
4. Hedimbi M., Shyam Singh, 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)
5. Vina A., Gitelson A.A., Nguy-Robertson A.L., Yi Peng. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. No. 12. Pp. 3468-3478. DOI: [10.1016/j.rse.2011.08.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.010)
6. Zygielbaum A.I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. No. 12. Pp. L12403-1 –L12403-4. DOI: [10.1029/2009GL038906](https://doi.org/10.1029/2009GL038906)
7. Emengini E.J., Blackburn G.A., Theobald J.C. Detection and discrimination of stress in bean (*Phaseolus vulgaris* Tendergreen) caused by oil pollution and waterlogging using combined spectral and thermal remote sensing // Research J. of Applied Sciences. 2013. Vol. 8. No. 6. Pp. 302–312. DOI: [10.3923/rjsci.2013.302.312](https://doi.org/10.3923/rjsci.2013.302.312)

8. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. No. 1-2. Pp. 195-213. DOI: [10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
9. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 148 с.
10. Шихов А.Н. Космический мониторинг засух на территории Уральского Прикамья по многолетним рядам данных дистанционного зондирования Земли // Географический вестник. 2013. № 4(27). С. 100-107.
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. USGS Digital Spectral Library 06. Режим доступа: <https://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06> (дата обращения 12.10.2018).

Three-spectrum Laser Method for Vegetation Monitoring

M.L. Belov^{1,*}, A.M. Belov¹,

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

V.A. Gorodnichev¹, A.V. Kuvshinov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser method, reflection coefficient, vegetation monitoring

Vegetation monitoring is one of advanced real-world application of laser sounding.

Pollution of environment, unfavourable external conditions, plant diseases, plant pests and other considerations lead to impossibility of plant healthy growth. For this reason engineering of monitoring system for vegetation cover remote sensing is important.

Methods of spectral analysis radiation reflected from vegetation cover allow получить operational information about vegetation health on a real time basis and on a large area. Today this optical methods are passive methods. The methods use natural radiation (direct or diffuse solar radiation), reflected from vegetation.

However, demerit passive optical sounding systems in visible and near infrared spectral bands is monitoring capability only during daylight and heavy reliance on optical state of the atmosphere.

The advanced version of optical band device, which allows monitor vegetation cover aside from the time of day at high flight altitude of airborne vehicle, is laser system, using reflection method for vegetation monitoring.

This work is concerned with capability analysis of laser reflection system, using for vegetation monitoring three eye-safe sounding wavelengths.

Operational efficiency analysis of remote sensing three-spectrum laser method for vegetation monitoring on eye-safe sounding wavelengths in ultraviolet and near infrared spectral bands is carried out. Statistical simulation with the use of spectral dependence of vegetation reflection coefficients show that three-spectrum laser method maybe take as a basis of vegetation monitoring. Remote sensing laser sounding on wavelengths 0,355, 1,54 and 2 μm allows to detect of vegetation under the unfavourable conditions with false alarm probability \sim tenths and second decimal places and correct detection probability next to one.

References

1. Fedotov Yu.V., Belov M.L., Bullo O.A., Gorodnichev V.A. Experimental research of different factors influencing on stability of laser induced fluorescence spectra of plants. *Proc. of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2017, vol. 10466, pp. 10466R-1 – 10466R-5. DOI: [10.1117/12.2285291](https://doi.org/10.1117/12.2285291)
2. 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)
3. Kazunori Saito. Plant and vegetation monitoring using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Industrial applications of laser remote sensing / Tetsuo Fukuchi, Tetsuo Shiina*. Saif Zone; Oak Park: Bentham Science Publ., 2012. Pp. 99-114. DOI: [10.2174/978160805340711201010099](https://doi.org/10.2174/978160805340711201010099)
4. Hedimbi M., Shyam Singh, 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)
5. Vina A., Gitelson A.A., Nguy-Robertson A.L., Yi Peng. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, no. 12, pp. 3468-3478. DOI: [10.1016/j.rse.2011.08.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.010)
6. Zygielbaum A.I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, no. 12, pp. L12403-1 – L12403-4. DOI: [10.1029/2009GL038906](https://doi.org/10.1029/2009GL038906)
7. Emengini E.J., Blackburn G.A., Theobald J.C. Detection and discrimination of stress in bean (*Phaseolus vulgaris* Tendergreen) caused by oil pollution and waterlogging using combined spectral and thermal remote sensing. *Research J. of Applied Sciences*, 2013, vol. 8, no. 6, pp. 302–312. DOI: [10.3923/rjsci.2013.302.312](https://doi.org/10.3923/rjsci.2013.302.312)
8. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 83, no. 1-2, pp. 195-213. DOI: [10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
9. Tokareva O.S. *Obrabotka i interpretatsiia dannykh distantsionnogo zondirovaniia Zemli* [Processing and interpretation Earth remote sensing data]. Tomsk: Tomsk State Univ. Publ., 2010. 148 p. (in Russian).
10. Shikhov A.N. The space monitoring of drought on the territory of Ural Kama region based of long-term remote sensing data series. *Geograficheskij vestnik* [Geographical Bull.], 2013, no. 4(27), pp. 100-107 (in Russian).
11. *GOST 31581-2012. Lazernaia bezopasnost'. Obshchie trebovaniia pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdelij. Vveden 2015-01-01* [GOST 31581-2012. Laser safety. General safety requirements for development and operation of laser products. Enter 2015-01-01]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 19 p. (in Russian).
12. USGS Digital Spectral Library 06. Available at: <https://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>, accessed 12.10.2018.