Лазерный флуоресцентный метод обнаружения стрессовых состояний растений, вызванных недостаточным уровнем питательных веществ или наличия загрязнителей в почве

12, декабрь 2012

DOI: 10.7463/1212.0506199

Белов М. Л., Булло О. А., Городничев В. А.

УДК 504.064.36

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

belov@bmstu.ru

ekomonit@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

Введение

Аналитические методы, основанные на анализе спектров лазерной индуцированной флуоресценции, широко используются в науке и технике. Создание мощных лазеров позволило распространить методы флуоресцентного анализа на область дистанционного зондирования (см., например [1-3]). Одной из перспективных областей использования флуоресцентного анализа может стать контроль состояния растительности (см., например, [4-17]).

Стрессовые состояния растений могут быть вызваны многими причинами - недостаточной или избыточной влажностью; механическими повреждениями; болезнями; низкими или высокими температурами; недостатком питательных веществ; недостатком освещенности; засолением почвы; загрязнением почвы нефтепродуктами или тяжелыми металлами; повышенной кислотностью почвы; использованием пестицидов, гербицидов, инсектицидов и т.п.

Такие стрессовые состояния сложно идентифицировать на ранних стадиях по внешнему виду растений. Однако, флуоресцентный анализ потенциально (см., например, [4-17]) позволяет обнаруживать стрессовые состояния растений по искажению спектров лазерно-индуцированной флуоресценции.

Постановка задачи.

Цель работы - анализ возможностей лазерного метода обнаружения стрессовых состояний растений, вызванных недостаточным уровнем питательных веществ или наличия загрязнителей в почве и определение (на основе этого анализа) длины волны возбуждения флуоресценции и спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для надежного обнаружения стрессовых состояний растительности.

Принцип действия лазерного флуориметра основан на облучении растительности лазером в ультрафиолетовом или видимом диапазонах (для возбуждения флуоресценции) и регистрации характеристик флуоресцентного излучения.

Наиболее важным информационным признаком флуоресценции растительности является форма спектров флуоресцентного излучения. Поскольку спектры флуоресценции здоровой растительности отличаются от спектров флуоресценции растительности в стрессовых ситуациях, это дает возможность обнаруживать стрессовые состояния растительности путем регистрации спектра флуоресценции высаженных в теплицах растений, участков сельскохозяйственных угодий и т.п.

Анализ спектров флуоресценции и определение наиболее перспективной длины волны возбуждения флуоресценции для задачи обнаружения стрессовых состояний растений.

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции различных видов здоровой растительности и растительности в различных стрессовых ситуациях (авторами статьи было проанализировано более ста публикаций). Эти экспериментальные данные были получены различными авторами, на разной аппаратуре, при разных длинах волн возбуждения (266, 275, 280, 300-400, 308, 325, 327, 337, 340, 355, 360, 380, 395, 396, 397, 400, 400-450, 404, 405, 408, 422, 425, 428, 436, 440, 450, 452, 460, 470, 440-500, 480, 488, 500, 515, 525, 532, 535, 550, 590, 600, 627, 630, 633, 635 нм).

Для возбуждения флуоресценции использовались лампы, светодиоды и самые разнообразные (полупроводниковые, газовые, твердотельные, эксимерные и др.) лазеры, излучающие в спектральном диапазоне от 226 до 635 нм. Наибольшее число экспериментов посвящено исследованию флуоресценции растений при использовании

(для возбуждения флуоресценции) лазеров на длинах волн 337 (азотный лазер), 355 и 532 нм (третья и вторая гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима).

Вид спектров флуоресценции растений существенно зависит от длины волны возбуждения. Анализ спектров флуоресценции показывает, что для контроля стрессовых состояний растений не все равно какую длину волны возбуждения использовать.

Для некоторых длин волн возбуждения стресс растений очень слабо влияет на форму спектра флуоресценции (см., например, рисунок 1 [13]). На рисунке показана спектральная зависимость интенсивности I флуоресценции *Jatropha curcas* (растения семейства Молочайные, вид рода Ятрофа) при возбуждении флуоресценции на длине волны 405 нм. Здесь 1 – контрольный образец, 2 – растение в стрессовом состоянии из-за недостатка воды. Рисунки а, б, с соответствуют измерениям через 1, 5 и 10 дней соответственно.

Для других длин волн возбуждения стресс растений практически не меняет форму спектра, но приводит к увеличению сигнала флуоресценции (см., например, рисунок 2 [8]).

Рис. 1. Спектр флуоресценции *Jatropha curcas* при возбуждении флуоресценции на длине волны 405 нм

Рис. 2. Спектр флуоресценции листьев соевых бобов при возбуждении флуоресценции на длине волны 280 нм

На рисунке 2 показана спектральная зависимость интенсивности I флуоресценции листьев соевых бобов (soybeans) при возбуждении флуоресценции на длине волны 280 нм. Здесь кривые 1 – 5 соответствуют разной величине процента отклонения от рекомендованного количества вносимых азотных удобрений: 1 – 100 %; 2 – 75 %; 3 – 50 %; 4 – 25 %; 5 – 0 %.

Хорошо видно, что, чем больше отклонение от рекомендованного количества вносимых азотных удобрений, тем больше сигнал флуоресценции. Однако, форма спектра флуоресценции меняется мало. При использовании такой длины волны возбуждения для контроля стрессов растений необходимо проводить измерение абсолютного значения флуоресцентного сигнала (что представляет собой сложную задачу).

Кроме того, на некоторых длинах волн возбуждения стресс растений может сильно влиять на форму спектра флуоресценции при одной причине стресса и слабо влиять при другой причине стресса (причем это влияние может по-разному проявляться в различных спектральных диапазонах). На рисунках 3, 4 [4] приведены спектры флуоресценции контрольного экземпляра растения (кривая 2) и растения (кривая 1), высаженного в почву при недостатке калия (рисунок 3) и воды (рисунок 4).

Рис. 3. Спектр флуоресценции листьев сои при недостатке калия для длины волны возбуждения флуоресценции 337 нм

Рис. 4. Спектр флуоресценции листьев сои при недостатке воды для длины волны возбуждения флуоресценции 337 нм

На рисунках показан спектр флуоресценции листьев сои при возбуждении флуоресценции на длине волны 337 нм. Хорошо видно, что для рисунка 3 интенсивность флуоресценции сильно возрастает в диапазоне длин волн 680 – 780 нм при стрессовом состоянии растения и почти не меняется в диапазоне 400 – 650 нм. Для рисунка 4 ситуация другая - интенсивность флуоресценции сильно увеличивается (при стрессовом состоянии растения) в диапазоне 400 – 650 нм и в меньшей степени увеличивается в диапазоне 680 – 780 нм.

Анализ спектров флуоресценции здоровой растительности и растительности в стрессовом состоянии при разных длинах волн возбуждения показывает, что наиболее ярко выраженные и наиболее устойчивые изменения в спектре флуоресценции растений (вызванные недостатком питательных веществ или наличием загрязнителей в почве) происходят при длинах волн возбуждения в зеленой (например, на второй гармонике лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима) или сине-зеленой областях спектра.

На рисунках 5 – 9 приведены примеры таких спектров флуоресценции растений, находящихся в нормальном и стрессовом состояниях.

На рисунке 5 [14] показаны спектры флуоресценции маиса - *Zea Mays* (длина волны возбуждения 488 нм). Стресс растений вызван внесением в почву кадмия; 1 – нормальное состояние; 2 – стрессовое состояние 0,1 ммоль Cd; 3 - стрессовое состояние 1,0 ммоль Cd.

На рисунке 6 [10] показаны спектры флуоресценции кедра (длина волны возбуждения 532 нм). Стресс был вызван внесением в почву нефтепродуктов; 1 – контрольный образец кедра; 2 – образец кедра, при внесении нефтепродуктов в почву.

Рис. 5. Спектры флуоресценции маиса при внесении в почву кадмия для длины волны возбуждения флуоресценции 488 нм

Рис. 6. Спектр флуоресценции кедра при внесении в почву нефтепродуктов для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм

На рисунке 7 [15] показаны спектры флуоресценции листьев кукурузы (длина волны возбуждения 532 нм). Стресс был вызван недостатком азотных удобрений в почве. Кривые 1 - 4 относятся к верхней стороне листа, кривые 5 - 8 - к нижней стороне

листа. Разные кривые для каждой стороны листа соответствуют разной дозе удобрений в почве - 28, 70, 140 и 280 кг на гектар (соответственно 20, 50, 100 и 150 % от рекомендованной дозы азотных удобрений). Кривые 3 и 8 соответствуют наибольшему дефициту азотных удобрений (28 кг на гектар или 20 %).

Рис. 7. Спектр флуоресценции кукурузы при недостатке азотных удобрений для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм

На рисунках 8, 9 показаны спектры флуоресценции газонной травы в нормальном и стрессовом состояниях, полученные авторами на созданной лабораторной установке.

Для возбуждения флуоресценции в созданной лабораторной установке использовалась вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима (длина волны 532 нм) Лабораторная установка и ее характеристики описаны в [17].

Рис. 8. Спектр флуоресценции газонной травы при добавлении в почву железного купороса для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм

Рис. 9. Спектр флуоресценции газонной травы при добавлении в почву медного купороса для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм

На рисунках 8 и 9 кривая 1 – спектр флуоресценции контрольного образца травы, кривая 2 – спектр флуоресценции травы в стрессовом состоянии, вызванным добавлением в почву железного купороса FeSO_4 (рисунок 8) и медного купороса CuSO_4 (рисунок 9).

Из рисунков 5-9 хорошо видно, что для растений в стрессовом состоянии характерно увеличение отношения интенсивности флуоресценции на длинах волн 680...690 к интенсивности флуоресценции на длинах волн 730...740 нм (на это указывалось ранее в работах разных авторов – см., например, [7, 10-12, 16]).

Таким образом, анализ спектров флуоресценции показывает, что для задачи обнаружения стрессовых состояний растений, вызванных недостатком питательных веществ или наличием загрязнителей в почве, наиболее перспективна длина волны возбуждения флуоресценции, которая лежит в зеленой или сине-зеленой областях спектра.

Этот вывод является интересным не только с научной точки зрения, но и дает возможность определить перспективный технический облик передающего канала лазерного флуориметра для обнаружения стрессовых состояний растений – для такого флуориметра для возбуждения флуоресценции лучше использовать вторую гармонику лазера на иттрий-алюминиевом гранате или лазерные диоды (светодиоды) в сине-зеленой области спектра).

Определение спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для надежного обнаружения стрессовых состояний растительности.

Наряду с выбором длины волны возбуждения флуоресценции важным является и определение технического облика приемного канала флуориметра.

Для цели оперативного (рутинного) контроля состояния растений не подходит флуориметр, регистрирующий спектр флуоресценции в широком спектральном диапазоне. Такой флуориметр является хорошим прибором для научных исследований, для работы в лаборатории и т.п. Его несомненные достоинства имеют и обратную сторону: он сложен, дорог, требует высококвалифицированного персонала (как для работы с флуориметром, так и для обработки и анализа данных измерений).

Для штатного контроля состояния растений, например, в теплицах, требуется менее дорогой и сложный прибор, не требующий высококвалифицированного персонала. Естественным вариантом такого измерителя является прибор, регистрирующий флуоресцентное излучение на нескольких длинах волн и проводящий автоматическую обработку данных измерений в масштабе времени близком к реальному. Анализ публикаций показывает, что к этому выводу пришли многие исследователи, рекомендуя проводить измерение всего на двух длинах волн: 680 (или 685 или 690) нм и 740 (или 735 или 730) нм и в качестве критерия обнаружения стрессовых состояний растений использовать отношение интенсивности флуоресценции на этих длинах волн.

Однако, на сегодняшний день нет работ, в которых бы проводилась оценка вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растений при выборе в качестве критерия обнаружения стрессовых состояний растений отношения интенсивности флуоресценции на указанных выше длинах волн.

Исследование вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растительности проводилось авторами методом математического моделирования.

Для этого был создан банк данных спектров флуоресценции листовых растений, на основе опубликованных в научной литературе экспериментально полученных спектров флуоресценции различных видов здоровой растительности и растительности, находящейся в стрессовом состоянии.

В качестве объектов моделирования были взяты спектры флуоресценции в диапазоне длин волн 600..800 нм. В банк данных были включены спектры, для которых возбуждение флуоресценции происходило под воздействием лазерного излучения на длине волны возбуждения 532 нм или близких к ней длинах волн: 488, 500, 525, 535 и 550 нм. В банке данных к настоящему времени записано около 100 экспериментально измеренных спектров флуоресценции растительности, находящейся в нормальном или стрессовом состоянии (разные виды трав; сельскохозяйственные культуры – кукуруза

разная, пшеница, рис, соя; листья фруктов, овощей, растений и цветов; лиственные деревья – береза, тополь, вишня, пальмы и др.).

Исследовались вероятности правильного обнаружения и ложных тревог при использовании в качестве идентифицирующего признака (растение в нормальном или стрессовом состоянии) отношения $R_{680/740}$ интенсивностей флуоресценции на двух длинах волн 680 и 740 нм (интенсивности флуоресценции брались в узком спектральном диапазоне 2...10 нм около этих длин волн; результаты моделирования, показанные ниже, приведены для диапазона 10 нм):

$$R_{680/740} = \frac{I(680)}{I(740)},$$

где $I(\lambda)$ - значение интенсивности флуоресценции на длине волны λ .

Отметим, что результаты моделирования дают близкие результаты, если в качестве длин волн регистрации выбрать (вместо 680 и 740 нм) длины волн 685 или 690 нм и 735 или 730 нм.

На рисунке 10 показано отношение $R_{680/740}$ для спектров растений и лиственных деревьев из банка данных. Каждая точка на рисунке соответствует одному спектру из банка данных. Прямая линия соответствуют значению $R_{680/740} = 1$. Из рисунка видно, что определение отношения $R_{680/740}$ не является достаточным для определения в каком состоянии находится растение – в нормальном или стрессовом (существуют трудности в обнаружении стресса для некоторых растений, при попадании признака $R_{680/740}$ в диапазон значений 0,9.. 1).

Рис. 10. Отношение $R_{680/740}$ для спектров растений и лиственных деревьев из банка данных

Результаты математического моделирования в условиях шума измерения приведены в Таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты математического моделирования для одного идентифицирующего признака. Порог $R_{680/740} = 1$.

Ср.кв. значение шума, %	Вероятность правильного обнаружения, %	Вероятность ложных тревог, %
15	79,568	3,151
10	82,42	2,214
8	83,136	1,907
6	82,908	1,695
4	82,124	1,211

Таблица 2

Результаты математического моделирования для одного идентифицирующего признака. Порог $R_{680/740} = 0,95$.

Ср.кв. значение шума, %	Вероятность правильного обнаружения, %	Вероятность ложных тревог, %
15	85,524	4,24
10	88,44	3,53
8	89,76	3,29
6	90,944	3,36
4	91,964	3,35

Для принятия решения об обнаружении стрессовых состояний растений использовались пороговые алгоритмы принятия решений. В таблицах приведены вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растений (вероятности принятия решения о наличии стрессовых состояний растений, когда они действительно имеют место) и ложных тревог (вероятности принятия решения о наличии стрессовых состояний растений, когда их в действительности нет) при разной величине относительного среднеквадратического значения шума измерения (при моделировании

использовались 10^4 шумовых реализаций). Таблица 1 соответствует порогу равному 1 (если идентифицирующий признак $R_{680/740}$ меньше 1, то растение находится в нормальном состоянии; если $R_{680/740}$ больше 1 - на растение действует некоторый стрессовый фактор), а Таблица 2 – порогу 0,95.

Результаты, приведенные в Таблицах 1 и 2, показывают, что вероятность правильного обнаружения стрессовых состояний растений оказывается не очень большой, а попытки увеличить ее за счет уменьшения порога приводят к возрастанию вероятности ложных тревог.

Увеличить вероятность правильного обнаружения стрессовых состояний растений можно, используя дополнительный идентифицирующий признак. Таким признаком может быть отношение $R_{680/700}$ интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 и 700 нм:

$$R_{680/700} = \frac{I(680)}{I(700)}$$

На рисунке 11 показаны спектры растений из банка данных на двумерной плоскости идентифицирующих признаков $R_{680/740}$ и $R_{680/700}$.

Рис. 11. Спектры растений из банка данных на двумерной плоскости идентифицирующих признаков $R_{680/740}$ и $R_{680/700}$

На рисунке 11: 1 – наиболее простая граница (в виде прямой линия - $R_{680/740} = -0,6R_{680/700} + 1,44$), разделяющая классы «растительность в нормальном состоянии» и «растительность при воздействии стрессового фактора». Она проведена на равном удалении от ближайших элементов двух классов [18]. Исключение составляет только один спектр растительности в нормальном состоянии, который можно отделить от спектров растительности при воздействии стрессового фактора только при более сложной (например, кусочно-линейной) границе классов.

Для принятия решения об обнаружении стрессовых состояний растений использовался пороговый алгоритм: если идентифицирующий признак $R_{680/740}$ ниже прямой линии разделяющей классы (меньше $-0,6R_{680/700} + 1,44$), то растение находится в нормальном состоянии; если $R_{680/740}$ выше прямой линии разделяющей классы (больше $-0,6R_{680/700} + 1,44$) - на растение действует некоторый стрессовый фактор.

Результаты математического моделирования вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растений и ложных тревог в условиях шума измерения приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования для двух идентифицирующих признаков

Ср.кв. значение шума, %	Вероятность правильного обнаружения, %	Вероятность ложных тревог, %
15	90,7	3,61
10	94,35	2,845
8	95,85	2,618
6	97,275	2,409
4	99,3	2,38

Результаты, приведенные в Таблице 3 показывают, что использование дополнительного идентифицирующего признака позволяет существенно увеличить вероятность правильного обнаружения стрессовых состояний растений (при среднеквадратическом значении шума 4 % вероятность правильного обнаружения стрессовых состояний растений составляет 99,3 % при вероятности ложных тревог 2,38 %).

Заключение.

Таким образом, анализ спектров флуоресценции и результаты математического моделирования показывают, что лазерный флуоресцентный метод, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 680, 740 и 700 нм и использующий для возбуждения флуоресценции излучение в зеленой или сине-зеленой областях спектра, позволяет надежно обнаруживать стрессовые состояния растительности, вызванные недостатком питательных веществ или наличием загрязнителей в почве.

Список литературы

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. Федотов Ю.В., Белов М.Л., Матросова О.А., Городничев В.А., Козинцев В.И. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 2. С. 39-47.
3. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И. Лазерный дистанционный метод классификации нефтяных загрязнений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 3. С. 17-25.
4. Emmett W. Chappelle [et al.] 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.
5. Emmett W. Chappelle [et al.] Laser-induced fluorescence of green plants. 2: LIF caused by nutrient deficiencies in corn // Applied Optics. 1984. Vol. 23. no. 1. P. 139-142.
6. Cecchi G., Bazzani M., Pantani L. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation // Proc. of SPIE. 1995. Vol. 2585. P. 48-56.
7. Luedeker W., Guenther K.P., Dahn H.-G. Laser induced fluorescence a tool for vegetation status- and stress- monitoring and optical aided agriculture // Proc. of SPIE. 1997. Vol. 3059. P.63 - 75.
9. Fateeva N.L., Matvienko G.G. Application of the method of laser-induced fluorescence // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5232. P. 652-657.
10. Matvienko G. [et al.] Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6367. P. 63670F-1 - 63670F-8.
11. Фатеева Н.Л., Климкин А.В., Бендер О.В., Зотикова А.П., Ямбуров М.С. Исследование лазерно-индуцированной флуоресценции хвойных и лиственных

растений при азотном загрязнении почвы // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 2-3. С. 212-215.

12. Belasque J. [et al.] Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy // Applied Optics. 2008. Vol. 47, no. 11. P. 1922-1926.

13. Gouveia-Neto A.S. [et al.] 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.

14. 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. // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 2008. Vol. 9. P. 29-35.

15. Middleton E. [et al.] Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 4879. P. 72-83.

16. Заворуев В.В., Заворуева Е.Н. Флуоресценция листьев тополей, растущих вблизи автомобильных дорог // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 437- 440.

17. Федотов Ю.В., Булло О.А., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений в стрессовых состояниях, вызванных механическими повреждениями // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/480063.html> (дата обращения 01.11.2012).

18. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

Laser fluorescence detection method of plant stress conditions caused by insufficient nutrients or contaminants in soil

12, December 2012

DOI: 10.7463/1212.0506199

Belov M.L., Bullo O.A., Gorodnichev V.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

belov@bmstu.ru

ekomonit@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

The authors analyzed fluorescence spectra of healthy vegetation and greenery under stress caused by lack of nutrients or presence of contaminants in soil. It is shown that use of fluorescence emission in the green or blue-green regions of spectrum and registration of fluorescent radiation in three narrow spectral ranges with central wavelengths of 680, 740 and 700 nm allows reliable detection of vegetation stress.

Publications with keywords: [fluorescence](#), [plant](#), [laser method](#), [detection of plant stress](#)

Publications with words: [fluorescence](#), [plant](#), [laser method](#), [detection of plant stress](#)

References

1. Measures R.M. *Laser remote sensing . Fundamentals and applications*. J. Wiley & Sons, New York, 1984. 510 p. (Russ. ed.: Mezheris R. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie*. Moscow, Mir, 1987. 550 p.).
2. Fedotov Iu.V., Belov M.L., Matrosova O.A., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Metod obnaruzheniia neftianykh zagriaznenii na vodnoi poverkhnosti, osnovannyi na registratsii fluorestsentnogo izlucheniia v dvukh uzkiikh spektral'nykh diapazonakh [Method of detection of oil pollution on water surface based on recording of fluorescent radiation in two narrow spectral ranges]. *Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2010, no. 2, pp. 39-47.
3. Fedotov Iu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Lazernyi distantsionnyi metod klassifikatsii neftianykh zagriaznenii [Laser remote method of oil pollution classification]. *Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2011, no. 3, pp. 17-25.

4. Emmett W. Chappelle, et al. 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.
5. Emmett W. Chappelle, et al. Laser-induced fluorescence of green plants. 2: LIF caused by nutrient deficiencies in corn. *Applied Optics*, 1984, vol. 23, no. 1, pp. 139-142.
6. Cecchi G., Bazzani M., Pantani L. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation. *Proc. of SPIE*, 1995, vol. 2585, pp. 48-56.
7. Luedeker W., Guenther K.P., Dahn H.-G. Laser induced fluorescence a tool for vegetation status- and stress- monitoring and optical aided agriculture. *Proc. of SPIE*, 1997, vol. 3059, pp. 63-75.
8. Emmett W. Chappelle, et al. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation. *Proc. of SPIE*, 1997, vol. 2959, pp. 1-10.
9. Fateeva N.L., Matvienko G. G. Application of the method of laser-induced fluorescence. *Proc. of SPIE*, 2004, vol. 5232, pp. 652-657.
10. Matvienko G., et al. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6367, pp. 63670F-1 - 63670F-8.
11. Fateeva N.L., Klimkin A.V., Bender O.V., Zotikova A.P., Iamburov M.S. Issledovanie lazerno-indutsirovani fluorestsentsii khvoynykh i listvennykh rastenii pri azotnom zagriaznenii pochvy [The study of laser-induced fluorescence of conifers and deciduous plants in the nitrogen pollution of the soil]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2006, vol. 19, no. 2-3, pp. 212-215.
12. Belasque J., et al. Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 11, pp. 1922-1926.
13. Gouveia-Neto A.S., et al. 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, pp. 79020A-1 - 79020A-10.
14. 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. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2008, vol. 9, pp. 29-35.
15. Middleton E., McMurtrey J.E., Encheva P.K. Campbell Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes. *Proc. of SPIE*, 2003, vol. 4879, pp. 72-83.
16. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Fluorestsentsiia list'ev topolei, rastushchikh vblizi avtomobil'nykh dorog [Fluorescence of poplar leaves, growing near the road]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2011, vol. 24, no. 5, pp. 437- 440.
17. Fedotov Iu.V., Bullo O.A., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Eksperimental'noe issledovanie lazernogo fluorestsentnogo metoda kontrolya sostoiianiia rastenii v stressovykh sostoiianiakh, vyzvannykh mekhanicheskimi povrezhdeniiami [Experimental studies of laser fluorescence method for remote sensing of plants in stressful

situations due to mechanical injuries]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/480063.html> , accessed 01.11.2012.

18. Aivazian S.A., Bukhshtaber V.M., Eniukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaia statistika: Klassifikatsiia i snizhenie razmernosti* [Applied Statistics: Classification and reduction of dimension]. Moscow, Finansy i statistika, 1989. 607 p.