Метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в пяти узких спектральных диапазонах

03, март 2013

DOI: 10.7463/0313.0539554

Федотов Ю. В., Матросова О. А., Белов М. Л., Городничев В. А.

УДК 535.338.41

Россия, НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана

belov@bmstu.ru

ekomonit@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

Введение

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных экологических задач является контроль (оперативное обнаружение и классификация) загрязнения окружающей среды нефтепродуктами [1, 2].

Загрязнения нефтепродуктами наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами, позволяющими инспектировать большие территории за сравнительно малый промежуток времени. Одним из наиболее перспективных дистанционных методов является лазерный флуоресцентный метод (см., например, [3-8]).

Данный метод позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения и проводить их идентификацию или, по крайней мере, классификацию по трем типам нефтепродуктов (легкие нефтепродукты, тяжелые нефтепродукты, сырая нефть) [3].

Задача обнаружения нефтяных загрязнений состоит в нахождении участков, загрязненных нефтью или нефтепродуктами, на фоне чистых природных образований. Задача классификации вида нефтяного загрязнения является на порядок более сложной задачей, чем обнаружение. Она состоит в определении типа нефтяного загрязнения. Классификация позволяет получить более подробную характеристику загрязнения и позволяет выявить источник загрязнения.

Исторически сложилось так, что сначала решалась задача обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, так как больший процент аварий происходил при

транспортировке нефти танкерами, по нефтепроводам и при добыче нефти на морском шельфе.. Для водной поверхности к настоящему времени разработаны и созданы различные лазерные (в основном флуоресцентные и спектрофотометрические) методы и приборы, предназначенные для дистанционного обнаружения и классификации нефтяных загрязнений (см., например, [3-11]).

Решение аналогичной задачи для земной поверхности является гораздо более сложным (из-за трудности обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности на фоне других природных образований и элементов ландшафта) и она на сегодняшний день не решена.

В настоящей работе рассматривается дистанционный метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в пяти узких спектральных диапазонах. Метод позволяет проводить классификацию по четырем группам: земная поверхность (незагрязненная нефтепродуктами); разлив на земной поверхности легких очищенных нефтепродуктов; разлив сырой нефти; разлив тяжелых нефтепродуктов.

Постановка задачи

Поскольку спектры флуоресценции легких нефтепродуктов, тяжелых нефтепродуктов и сырой нефти отличаются между собой и от спектров флуоресценции элементов земного ландшафта, это дает потенциальную возможность обнаруживать и классифицировать нефтяные загрязнения путем регистрации и анализа формы спектра флуоресценции исследуемого участка поверхности.

Однако на сегодняшний день данных о спектрах флуоресценции чистых (не загрязненных нефтепродуктами) земных поверхностей для длин волн возбуждения флуоресценции, используемых для контроля нефтяных загрязнений, очень мало. Причем, аналогичные данные о спектрах флуоресценции земных поверхностей, загрязненных нефтепродуктами, отсутствуют вообще.

Поэтому первый этап работы был посвящен экспериментальным исследованиям спектров флуоресценции земных поверхностей и нефтепродуктов.

Для экспериментального исследования спектров флуоресценции земных поверхностей и нефтепродуктов была создана лабораторная установка. В качестве источника возбуждения излучения флуоресценции использовалась четвертая гармоника YAG:Nd лазера (266 нм). Подсистема регистрации излучения состояла из полихроматора и высокочувствительного матричного детектора с усилителем яркости на основе ЭОП и позволяла регистрировать

спектры флуоресценции в диапазоне 295 – 700 нм. Перед проведением измерений проводилась калибровка измерительной аппаратуры (см. [12]).

Были измерены спектры флуоресценции чистых нефтепродуктов (сырая нефть Альметьевская, дизельное топливо, керосин, бензин А-80, бензин А-92, бензин А-95, бензин А-95 Shell, бензин А-98, масло машинное отработанное, масло машинное Castrol 10w40); различных типов земных поверхностей - воды (водопроводной, снеговой, со взвесью чернозема, глины, песка), растительности (листья деревьев, мох, салат, трава), почвы (чернозём, глина, торф, песок, песчаная почва, известняк, почва из соснового бора, почва из березовой рощи, почва из дубравы и др.), асфальта и нефтепродуктов, разлитых на различных земных поверхностях.

Измеряемые образцы подготавливались следующим образом. Для случая незагрязненных земных поверхностей (почвы, растительность и асфальт) вещество помещалось в чашку Петри и проводилось измерение. В случае измерения спектров воды, для предотвращения излучения флуоресценции самой чашки, на дно чашки сначала помещалась почва (чернозем, глина или песок), которая препятствовала прохождению излучения до чашки и ее флуоресценции, а потом наливалась вода. Таким образом, моделировались естественные лужи на черноземе, глине и песке. Нефтяные загрязнения моделировались путем помещения почв и растительности в чашку Петри и поливанием их нефтепродуктами. Для каждого образца измерялось три спектра интенсивности флуоресценции и интенсивность упругого рассеянного излучения на 266 нм в трех разных точках образца. При измерении спектров флуоресценции чистых нефтепродуктов вещество наливалось в кювету толстым слоем, так чтобы лазерное излучение полностью поглощалось и не достигало дна кюветы.

Примеры исследуемых образцов представлены на рисунке 1: а – почва из соснового бора; б – песок; в – мох, загрязненный бензином; г – глина, загрязненная дизельным топливом; д – известняк, загрязненный нефтью.

Рис. 1. Примеры исследуемых образцов

В ходе проведенных лабораторных исследований были накоплены 870 спектров флуоресценции различных образцов чистых и загрязненных земных поверхностей, которые в дальнейшем использовались в качестве исходных данных для разработки метода обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Для примера на рисунках 2-6 показаны спектры флуоресценции разных типов нефтепродуктов, воды, хлорофилла, асфальта (рисунок 2); некоторых типов почв (рисунок 3); чистого бензина А92 и бензина разлитого на разных поверхностях (рисунок 4); чистого и разлитого на разных поверхностях машинного масла (рисунок 5); чистой Альметьевской нефти и этой же нефти разлитой на разных поверхностях (рисунок 6).

На рисунках приведены нормированные на сигнал упругого рассеяния на длине волны 266 нм спектры флуоресценции.

На рисунке 2: 1 - бензин А92 на глине, 2 – масло машинное Castrol 10w40 на песчаной почве, 3 – нефть Альметьевская на торфе, 4 – вода с взвесью чернозема, 5 – мох, 6 – асфальт.

Рис. 2. Спектры флуоресценции нефтепродуктов, воды, хлорофилла и асфальта

На рис. 3: 1 - чернозём; 2 – глина, 3 – известняк, 4 – песок, 5 - песчаная почва, 6 – торф, 7 - почва из соснового бора, 8 - почва из березовой рощи, 9 – почва из дубравы.

Рис. 3. Спектры флуоресценции почв

На рис. 4: 1 – чистый бензин А92, 2 – бензин А92, разлитый на черноземе, 3 – на глине, 4 – на известняке, 5 – на песке, 6 – на песчаной почве, 7 – на торфе, 8 – на почве из соснового бора.

Рис. 4. Спектры флуоресценции чистого бензина и бензина разлитого на разных поверхностях

На рис. 5: 1 – чистое машинное масло Castrol 10w40, 2 – Castrol 10w40, разлитый на черноземе, 3 – на глине, 4 – на известняке, 5 – на песке, 6 – на песчаной почве, 7 – на торфе, 8 – на почве из соснового бора.

Рис. 5. Спектры флуоресценции чистого и разлитого на разных поверхностях машинного масла

На рис. 6: 1 – чистая нефть Альметьевская, 2 – нефть Альметьевская, разлитая на черноземе, 3 – на глине, 4 – на известняке, 5 – на песке, 6 – на песчаной почве, 7 – на торфе, 8 – на почве из соснового бора.

Рис. 6. Спектры флуоресценции чистой нефти и нефти разлитой на разных поверхностях

Из рисунков 2 - 6, во-первых, видно, что интенсивность флуоресценции для почв гораздо меньше (на два порядка), чем для нефтепродуктов и спектры флуоресценции имеют случайную структуру. Во-вторых, видно, что интенсивность флуоресценции для растительности, воды и асфальта может быть сравнима с интенсивностью флуоресценции нефтепродуктов, однако спектры флуоресценции нефтепродуктов заметно отличаются от спектров флуоресценции растительности, воды и асфальта.

Метод классификации

Задачу классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности целесообразно решать в несколько этапов.

На первом этапе решается задача обнаружения нефтяных загрязнений. Этот этап подробно описан в работе авторов [13]. Метод обнаружения основан на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах. Вопрос о выборе из широкого спектра флуоресценции лишь некоторого числа регистрируемых узких спектральных диапазонов решался, используя экспериментально измеренные спектры флуоресценции и математическое моделирование.

Результаты математического моделирования показывают, что для задачи обнаружения нефтепродуктов на фоне растительности, воды и асфальта можно ограничиться тремя узкими спектральными диапазонами (309,5-317,5 нм, 330,5-338,5 нм, 396,0-404,0 нм) с центральными длинами волн $\lambda_1 = 313,5$ нм, $\lambda_2 = 334,5$ нм и $\lambda_3 = 400,0$ нм. В качестве признаков, используемых для обнаружения, могут быть взяты отношения интенсивностей флуоресценции

$$\frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_1)} \text{ и } \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)}.$$

Исследуемые вещества и границы классов («нефтяное загрязнение» и «земная поверхность») для задачи обнаружения в двумерном пространстве выбранных признаков представлены на рисунке 7 (границы классов показаны на рисунке тонкой сплошной линией).

Рис. 7. Исследуемые вещества и границы классов в двумерном пространстве выбранных признаков

Описанный этап позволяет с вероятностью близкой к единице (см. [13]) определить загрязненные и незагрязненные нефтепродуктами элементы земного ландшафта.

На следующем этапе необходимо решить задачу классификации. Из рисунка 7 видно, что три длины волны (два выбранных признака) не позволяют провести классификацию. Поэтому необходимо добавить к имеющимся спектральным каналам несколько новых спектральных каналов для решения сначала задачи разделения пары классов «легкие нефтепродукты» – «тяжелые нефтепродукты», а потом для разделения классов «сырая нефть»- «тяжелые нефтепродукты» и «легкие нефтепродукты».

Математическое моделирование показало, что для разделения классов «легкие нефтепродукты» – «тяжелые нефтепродукты» необходимо добавить два спектральных канала: 335-343 нм и 354,5-362,5 нм с центральными длинами волн $\lambda_4 = 339$ нм, $\lambda_5 = 358,5$ нм. Признаками классификации для разделения классов «легкие нефтепродукты» и «тяжелые нефтепродукты» являются следующие величины:

$$\frac{I(\lambda_4)}{I(\lambda_2)} \text{ и } \frac{I(\lambda_5)}{I(\lambda_2)}$$

Для разделения классов «сырая нефть» - «тяжелые нефтепродукты» и «легкие нефтепродукты» перебирались все возможные комбинации из уже выбранных спектральных каналов. Математическое моделирование показало, что признак $\frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_5)}$ достаточен для разделения этих классов.

Исследуемые вещества классов «легкие нефтепродукты», «тяжелые нефтепродукты» и «сырая нефть» в пространстве выбранных признаков приведены на рисунке 8.

Рис. 8. Исследуемые вещества в пространстве классифицирующих признаков

Таким образом, алгоритм классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности (совместно с обнаружением нефтяных загрязнений) имеет вид:

1 этап. Проверяется принадлежность исследуемого вещества к одному из типов «земной поверхности» («почвы»). Для этого сравнивается сумма интенсивностей флуоресценции (нормированных на сигнал A упругого рассеяния на длине волны 266 нм) в трех спектральных каналах с пороговым значением $K1$

$$\begin{aligned} \text{если } \frac{I(\lambda_1) + I(\lambda_2) + I(\lambda_3)}{A} &\leq K1, \text{ то «почвы»;} \\ \text{если } \frac{I(\lambda_1) + I(\lambda_2) + I(\lambda_3)}{A} &> K1, \text{ то не «почвы»,} \end{aligned}$$

где $K1 = 3 \cdot 10^{-4}$.

В случае если вещество отнесено к классу «почв», то принимаем решение об отсутствии нефтяного загрязнения. В случае если вещество отнесено к классу не «почвы», то переходим ко второму этапу алгоритма.

2 этап. Проверяется принадлежность исследуемого вещества к одной из областей «нефтяное загрязнение» или «земная поверхность»

$$\text{если } \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \geq K2 \wedge \frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_1)} \geq K3, \text{ то «нефтяное загрязнение»,}$$

$$\text{если } \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} < K2 \vee \frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_1)} < K3, \text{ то «земная поверхность»,}$$

где $K2=1.8$, $K3=1.75$.

В случае если вещество отнесено к классу «земная поверхность», то принимаем решение об отсутствии нефтяного загрязнения. В случае если вещество отнесено к классу «нефтяное загрязнение», то переходим к третьему этапу алгоритма.

3 этап. Проверяется принадлежность исследуемого вещества к одной из областей «сырая нефть» или «легкие нефтепродукты» и «тяжелые нефтепродукты»

$$\text{если } \frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_5)} \geq K4, \text{ то «сырая нефть»,}$$

$$\text{если } \frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_5)} < K4, \text{ то «легкие нефтепродукты» и «тяжелые нефтепродукты»,}$$

где $K4=1.15$.

4 этап. Проверяется принадлежность исследуемого вещества к одной из областей «легкие нефтепродукты» или «тяжелые нефтепродукты»

$$\text{если } \omega_1 \cdot \frac{I(\lambda_4)}{I(\lambda_2)} + \omega_2 \cdot \frac{I(\lambda_5)}{I(\lambda_2)} + \omega_0 \geq 0, \text{ то «тяжелые нефтепродукты»}$$

$$\text{если } \omega_1 \cdot \frac{I(\lambda_4)}{I(\lambda_2)} + \omega_2 \cdot \frac{I(\lambda_5)}{I(\lambda_2)} + \omega_0 < 0, \text{ то «легкие нефтепродукты»,}$$

где $\omega_1 = -18.308$, $\omega_2 = 43.116$, $\omega_0 = -28.733$ - коэффициенты, выбранные методом опорных векторов.

Значения порогов $K1-K4$ выбираются по результатам математического моделирования.

Исследуемые вещества в пространстве выбранного признака и граница классов для разделения классов «легкие нефтепродукты» или «тяжелые нефтепродукты» или «сырая нефть» приведены на рисунке 9.

Рис. 9. Исследуемые вещества и граница классов в пространстве классифицирующих признаков

Исследуемые вещества в пространстве выбранных признаков и границы классов для разделения классов «легкие нефтепродукты» и «тяжелые нефтепродукты» приведены на рисунке 10. На рисунке K5 – граница областей «легкие нефтепродукты» или «тяжелые нефтепродукты» (она зависит от коэффициентов $\omega_1, \omega_2, \omega_0$ и определяется выражением приведенным для 4 этапа).

Рис. 10. Исследуемые вещества и граница классов в двумерном пространстве классифицирующих признаков

Математическое моделирование

Для оценки эффективности описанного алгоритма находилась (по всему массиву спектров флуоресценции) вероятность правильной классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Результаты математического моделирования приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Вероятности правильной классификации для нефтяных загрязнений

Решение алгоритма классификации Исследуемые вещества	Легкие нефтепродукты (керосин, бензины)	Тяжелые нефтепродукты (дизельное топливо, масло);	Сырая нефть	Земные поверхности
Легкие нефтепродукты	98,31	0,56	0,00	1,13
Тяжелые нефтепродукты	0,00	95,56	0,37	4,07
Сырая нефть	0,00	0,00	99,25	0,75
Земные поверхности	0,00	0,71	0,35	98,94

Результаты математического моделирования показывают, что вероятность правильной классификации больше 95,56 %.

Заключение

Таким образом, результаты математического моделирования показывают, что метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в пяти узких спектральных диапазонах, позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения с вероятностью правильной классификации больше 95,56 %.

Список литературы

1. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.
2. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 270 с.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. Hengsternann T., Reuter R. Lidar fluorosensing of mineral oil spills on sea surface // Applied Optics. 1990. Vol. 29, no. 22. P. 3218-3227.
5. Климкин В.М., Сокоиков В.Г., Федорищев В.Н. Новые возможности дистанционного анализа нефтепродуктов на поверхности вод // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6, № 2. С. 189-204.

6. Глушков С.М. и др. Проблемы лазерной флуориметрии органических примесей в природных водах // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7, № 4. С. 464-473.
7. 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. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 2. С. 39-47.
8. Федотов Ю.В., Белов М.Л., Матросова О.А., Городничев В.А., Козинцев В.И. Метод выбора спектральных каналов регистрации излучения флуоресценции на основе расстояния Махаланобиса для задачи обнаружения нефтяных загрязнений // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 9-3. С. 52-57.
9. Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И., Стрелков Б.В. Обнаружение нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности с помощью трехлучевого метода // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15, № 10. С. 900-901.
10. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Смирнова О.А., Федотов Ю.В., Хрусталева А.М. Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности с помощью двухспектрального метода // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 872-874.
11. Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А., Козинцев В.И. Лазерный метод контроля тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на измерении первой и второй производных коэффициента отражения // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 568-571.
12. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции природных образований и нефтяных загрязнений // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/256187.html> (дата обращения 11.12.2012).
13. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Обнаружение нефтяных загрязнений на земной поверхности на основе регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2013. В печати.

Method of classification of oil slicks on the earth surface, based on detection of fluorescent radiation in five narrow spectral ranges

03, March 2013

DOI: 10.7463/0313.0539554

Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A.

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

belov@bmstu.ru

ekomonit@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

The article deals with classification of oil slicks on the earth surface. The authors provide experimentally obtained fluorescence spectra of pure oil and petroleum products; of various earth surfaces that are not polluted with oil; of oil and petroleum products spilled on various earth surfaces. It is shown that the use of the method based on detection of fluorescent radiation in five narrow spectral ranges allows to detect and classify oil slicks on the earth surface with probability of correct detection and correct classification close to one.

Publications with keywords: [laser](#), [fluorescence spectra](#), [oil pollution](#), [earth's surface](#), [classification](#)

Publications with words: [laser](#), [fluorescence spectra](#), [oil pollution](#), [earth's surface](#), [classification](#)

References

1. Patin S.A. *Neft' i ekologiya kontinental'nogo shel'fa* [Oil and ecology of the continental shelf]. Moscow, VNIRO Publ., 2001. 247 p.
2. Drugov Iu.S., Rodin A.A. *Ekologicheskie analizy pri razlivakh nefi i nefteproduktov* [Environmental analyses at spill of oil and petroleum products]. Moscow, BINOM. Laboratoriia znanii, 2007. 270 p.
3. 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.).
4. Hengstermann T., Reuter R. Lidar fluorosensing of mineral oil spills on sea surface. *Applied Optics*, 1990, vol. 29, no. 22, pp. 3218-3227.

5. Klimkin V.M., Sokovikov V.G., Fedorishchev V.N. Novye vozmozhnosti distantsionnogo analiza nefteproduktov na poverkhnosti vod [New possibilities for remote analysis of oil products on water surface]. *Optika atmosfery i okeana*, 1993, vol. 6, no. 2, pp. 189-204. (Trans. version: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 1993, vol. 6, no. 2, pp. 189-204.).
6. Glushkov S.M., Fadeev V.V., Chubarov V.V. Problemy lazernoi fluorimetrii organicheskikh primesei v prirodnykh vodakh [Laser spectrometers for diagnostics of organic admixtures in natural water]. *Optika atmosfery i okeana*, 1994, vol. 7, no. 4, pp. 464-473. (Trans. version: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 1994, vol. 7, no. 4, pp. 246-250.).
7. Fedotov Iu.V., Belov M.L., Matrosova O.A., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Metod obnaruzheniia nefதியන්ကုန် ချွေအိတ်တီ နာ ဝုဒ်နီ ပုဗ္ဗကုန်တီ, ဝုဒ်နီ နာ ရီဂီစထရီတီ ဖလုဗ္ဗေစီတီ နာ ဝုဒ်နီ နာ ရီဂီစထရီတီ နာ ဝုဒ်နီ နာ ရီဂီစထရီတီ [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* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2010, no. 2, pp. 39-47.
8. Fedotov Iu.V., Belov M.L., Matrosova O.A., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Metod vybora spektral'nykh kanalov registratsii izlucheniia fluorestsentsii na osnove rasstoianiia Makhalanobisa dlia zadachi obnaruzheniia nefதியන්ကုန် ချွေအိတ်တီ [The method of choice of the spectral channels of registration of emission of fluorescence on the basis of the Mahalanobis distance for the problem of oil pollution detection]. *Izvestiia vuzov. Fizika*, 2010, vol. 53, no. 9-3, pp. 52-57.
9. Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I., Strelkov B.V. Obnaruzhenie nefதியන්ကုန် ချွေအိတ်တီ နာ ဝုဒ်နီ ပုဗ္ဗကုန်တီ နာ ဝုဒ်နီ ပုဗ္ဗကုန်တီ [Detection of oil spills on rough sea surface using a three-beam laser method]. *Optika atmosfery i okeana*, 2002, vol.15, no 10, pp. 900-901. (Trans. version: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2002, vol. 15. No. 10, pp. 816-817.).
10. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Smirnova O.A., Fedotov Yu.V., Khrustaleva A.M. Distantsionnoe obnaruzhenie nefதியන්ကုန် ချွေအိတ်တီ နာ ဝုဒ်နီ ပုဗ္ဗကုန်တီ နာ ဝုဒ်နီ ပုဗ္ဗကုန်တီ [Two-wave laser method for remote detection of oil spills on rough sea surface]. *Optika atmosfery i okeana*, 2006, vol. 19, no. 10, pp. 872-874. (Trans. version: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2006, vol. 19, no. 10, pp. 784-786.).
11. Belov M.L., Belov A.M., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Lazernyi metod kontroliia tonkikh plenok nefteproduktov na vodnoi poverkhnosti, osnovannyi na izmerenii pervoi i vtoroi proizvodnykh koeffitsienta otrazheniia [Laser method of control for thin oil films on water surface based on measurement of second-order derivatives of reflection coefficient]. *Optika atmosfery i okeana*, 2011, vol. 24, no. 7, pp. 568-571.
12. Fedotov Iu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Eksperimental'nye issledovaniia spektrov fluorestsentsii prirodnykh obrazovaniia i nefதியන්ကုန် ချွေအိတ်တီ [Experimental research of fluorescent spectrums of natural formations and oil pollution]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the

Bauman MSTU], 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/256187.html> , accessed 11.12.2012.

13. Fedotov Iu.V, Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Obnaruzhenie nef'tian'nykh zagriaznenii na zemnoi poverkhnosti na osnove registratsii fluorestscentnogo izlucheniia v trekh uzkiikh spektral'nykh diapazonakh [Detection of oil pollution on the earth's surface on the basis of registration of fluorescent radiation in three narrow spectral ranges]. *Optika atmosfery i okeana*, 2013. In press.