

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

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

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
НИИ радиоэлектроники и лазерной техники  
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5*

Поступила в редакцию 9.04.2013 г.

Рассматривается задача классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности. Показано, что использование метода, основанного на регистрации флуоресцентного излучения в пяти узких спектральных диапазонах, позволяет проводить классификацию нефтяных загрязнений на земной поверхности с вероятностью правильной классификации, близкой к единице.

*Ключевые слова:* лазер, спектры флуоресценции, нефтяные загрязнения, земная поверхность, классификация; laser, fluorescence spectra, oil pollution, earth's surface, classification.

Загрязнения нефтепродуктами наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами, позволяющими инспектировать большие территории за сравнительно малый промежуток времени. Перспективными дистанционными методами контроля нефтяных загрязнений являются лазерные методы.

Для дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности к настоящему времени разработаны различные лазерные (в основном флуоресцентные и спектрофотометрические) методы и приборы (см., например, [1–5]). Для обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности используют лабораторные методы, основанные на химическом анализе или флуоресцентной диагностике специально подготовленных проб загрязненных почв. Задача дистанционного лазерного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности исследовалась в [6]. В настоящей статье рассматривается лазерный флуоресцентный метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Лазерный флуоресцентный метод потенциально позволяет проводить классификацию нефтяных загрязнений на водной поверхности по трем типам нефтепродуктов: легкие нефтепродукты (ЛН), тяжелые

нефтепродукты (ТН), сырая нефть (СН) (см., например, [1]). Физической основой решения задачи классификации является различие формы спектров флуоресценции этих нефтепродуктов. На рис. 1 для примера показаны измеренные спектры флуоресценции нефтепродуктов.

Следует отметить, что порядок нумерации спектров флуоресценции на рис. 1 соответствует увеличению плотности исследуемых веществ. Видно, что при увеличении плотности нефтепродукта максимум спектра флуоресценции смещается в область больших длин волн. Кроме того, при увеличении плотности исследуемого вещества наблюдается тенденция к расширению спектра флуоресценции. Таким образом, из рис. 1 видно (это уже отмечалось ранее, например, в [1]), что нефтепродукты могут быть разделены по спектрам флуоресценции на три группы, а именно: легкие (спектры 1, 2, 3), тяжелые (4, 5, 6) нефтепродукты и сырая нефть (спектр 7).

Решение задачи классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности усложняется трудностью классификации нефтяных загрязнений на фоне других природных образований. Исходными данными для разработки метода классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности являются экспериментально полученные (на длине волны возбуждения 266 нм) спектры флуоресценции нефтепродуктов, различных типов земных поверхностей и нефтепродуктов, разлитых на разных поверхностях [6, 7].

\* Юрий Викторович Федотов (fed@bmstu.ru); Ольга Александровна Матросова (ekomonit@bmstu.ru); Михаил Леонидович Белов (ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru); Виктор Александрович Городничев (gorod@bmstu.ru).

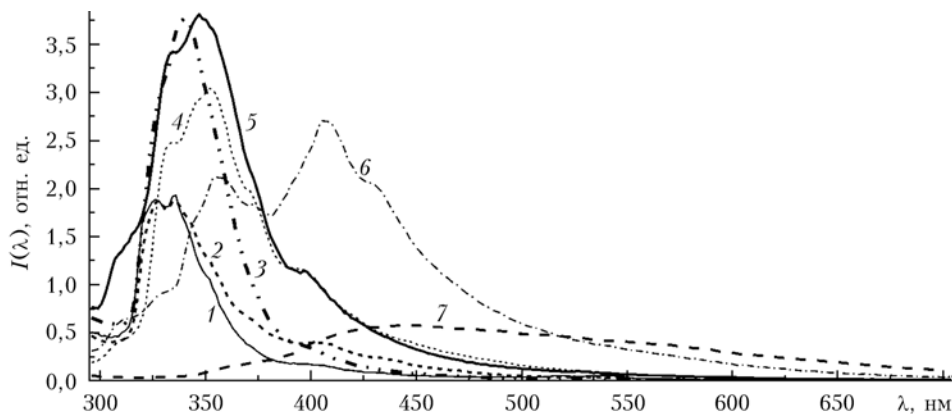


Рис. 1. Спектры флуоресценции нефтепродуктов: 1 – бензин А-80; 2 – бензин А-92; 3 – керосин; 4 – дизельное топливо; 5 – масло машинное Castrol 10w40; 6 – масло машинное отработанное; 7 – нефть Альметьевская

Задача классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности решалась с использованием разработанного эвристического алгоритма, основанного на анализе спектров флуоресценции нефтепродуктов и фоновых природных образований. В рамках эвристически разработанного алгоритма результаты математического моделирования позволили найти число спектральных каналов, обеспечивающих решение задачи классификации, а также центральные длины волн и ширину спектральных каналов.

Анализ спектров флуоресценции показал [6, 7], что интенсивность флуоресценции для почв гораздо меньше (на два порядка), чем для нефтепродуктов; 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.

Задача классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности может быть решена только после предварительного этапа обнаружения нефтяных загрязнений. Этот этап подробно описан в работе [6]. Метод обнаружения основан на регистрации флуоресцентного излучения в трех спектральных диапазонах: 309,5–317,5, 330,5–338,5, 396,0–404,0 нм с центральными длинами волн  $\lambda_1 = 313,5$ ,  $\lambda_2 = 334,5$  и  $\lambda_3 = 400,0$  нм. В качестве признаков, используемых для обнаружения, взяты отношения интенсивностей флуоресценции  $I(\lambda_3)/I(\lambda_1)$  и  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1)$ . Метод обнаружения [6] позволяет с вероятностью, близкой к единице, находить нефтяные загрязнения. Результаты [6] также показывают, что два выбранных признака не позволяют провести классификацию, поэтому необходимо добавить к имеющимся спектральным каналам несколько новых.

Математическое моделирование (на основе экспериментально измеренных спектров флуоресценции) показало, что для разделения классов ЛН и ТН необходимо добавить два спектральных канала: 335–343 и 354,5–362,5 нм с центральными длинами волн  $\lambda_4 = 339$ ,  $\lambda_5 = 358,5$  нм. Признаками для разделения классов ЛН и ТН являются величины  $I(\lambda_4)/I(\lambda_2)$  и  $I(\lambda_5)/I(\lambda_2)$ . Алгоритм проверки принадлежности исследуемого вещества к одному из классов имеет

следующий вид: если  $a[I(\lambda_4)/I(\lambda_2)] + b[I(\lambda_5)/I(\lambda_2)] + c \geq 0$ , то ТН; если  $a[I(\lambda_4)/I(\lambda_2)] + b[I(\lambda_5)/I(\lambda_2)] + c < 0$ , то ЛН, где  $a = -18,308$ ,  $b = 43,116$ ,  $c = -28,733$  – коэффициенты, выбранные методом опорных векторов. Исследуемые вещества в пространстве выбранных признаков и граница для разделения классов ЛН и ТН приведены на рис. 2 (ГК – граница классов).

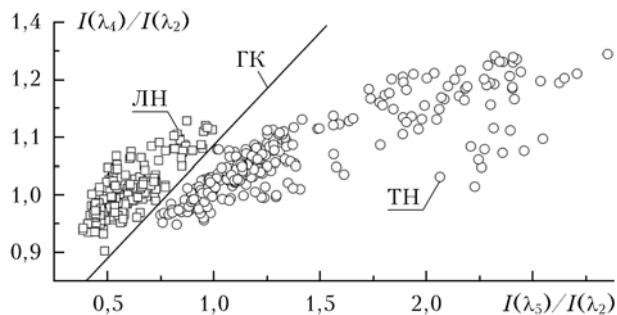


Рис. 2. Исследуемые вещества и граница классов ЛН или ТН в двумерном пространстве классифицирующих признаков

Для разделения классов СН и ЛН, ТН перебирались все возможные комбинации из уже выбранных (для обнаружения и разделения ЛН и ТН) пяти спектральных каналов. Моделирование показало, что признак  $I(\lambda_3)/I(\lambda_5)$  достаточен для разделения классов СН и ЛН, ТН. Алгоритм проверки принадлежности к одному из классов СН или ЛН и ТН имеет вид: если  $I(\lambda_3)/I(\lambda_5) \geq K$ , то СН; если  $I(\lambda_3)/I(\lambda_5) < K$ , то ЛН и ТН ( $K = 1,15$  – порог). Исследуемые вещества в пространстве выбранного признака и граница классов приведены на рис. 3.

В трехмерном пространстве выбранных признаков вещества классов «легкие нефтепродукты», «тяжелые нефтепродукты» и «сырая нефть» приведены на рис. 4.

Для оценки эффективности описанного алгоритма классификации находилась (по всему массиву спектров флуоресценции) вероятность классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности. Результаты математического моделирования приведены в таблице.

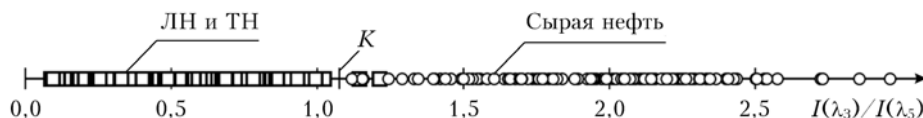


Рис. 3. Исследуемые вещества и граница классов «сырая нефть» или «тяжелые нефтепродукты» и «легкие нефтепродукты»

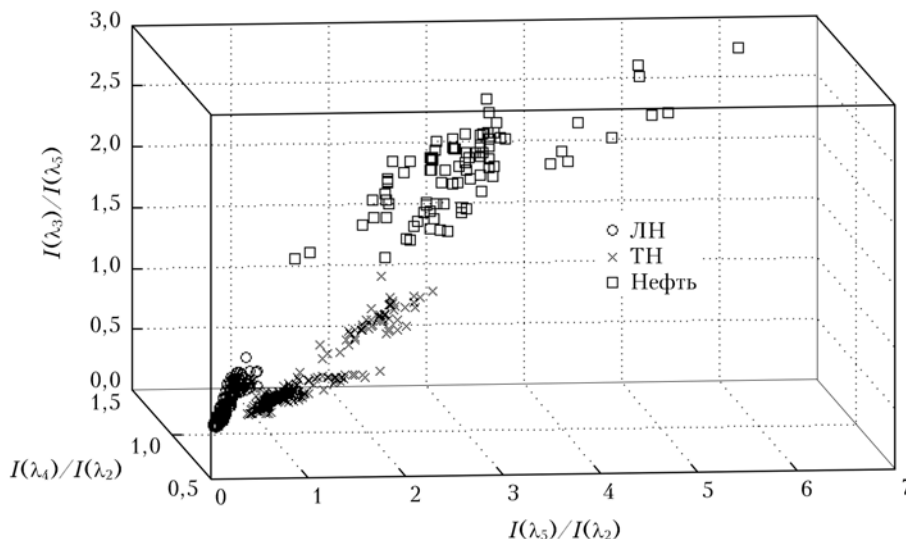


Рис. 4. Исследуемые вещества классов «легкие нефтепродукты», «тяжелые нефтепродукты» и «сырая нефть» в трехмерном пространстве выбранных признаков

#### Вероятности классификации для нефтяных загрязнений на земной поверхности

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

Из таблицы видно, что вероятности правильной классификации нефтепродуктов на земной поверхности (выделены жирным шрифтом) больше 95,56%.

Таким образом, показано, что метод, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в пяти узких спектральных диапазонах, позволяет классифицировать нефтяные загрязнения на земной поверхности по трем типам нефтепродуктов — легкие и тяжелые нефтепродукты, сырая нефть с вероятностью правильной классификации более 95,56%. Разработанный метод можно рассматривать как один из подходов к задаче классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, который можно использовать, уточняя параметры алгоритма классификации для каждого конкретного случая.

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. Климкин В.М., Макогон М.М., Федорищев В.Н. Исследование загрязнения водной поверхности системы во-

- доемов Верхней Волги нефтяными пленками // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 4. С. 450–454.
3. Климкин В.М., Соковиков В.Г., Федорищев В.Н. Новые возможности дистанционного анализа нефтепродуктов на поверхности вод // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 2. С. 189–204.
4. Климкин В.М., Федорищев В.Н. Исследование возможности подавления сигналов фоновой флуоресценции в задачах дистанционного обнаружения нефтяных пленок // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 4. С. 632–639.
5. Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И., Стрелков Б.В. Обнаружение нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности с помощью трехлучевого метода // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 10. С. 900–901.
6. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 208–212.

7. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции природных образо-

ваний и нефтяных загрязнений // Наука и образование. 2011. № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/256187.html>

*Yu.V. Fedotov, O.A. Matrosova, M.L. Belov, V.A. Gorodnichev. Method of classification of oil pollution on ground surface based on fluorescence radiation recording within five narrow spectral bands.*

The problem of classification of oil pollution on ground surface is considered. It is shown that the use of laser method based on fluorescence radiation recording within five narrow spectral bands allows one to classify oil pollution on ground surface with probability of correct classification close to unity.