

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 535.338.41

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

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

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

Поступила в редакцию 3.08.2012 г.

Рассматривается задача обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности. Приводятся экспериментально полученные спектры флуоресценции чистых нефтепродуктов, различных земных поверхностей и нефтепродуктов, разлитых на различных земных поверхностях. Показано, что использование метода, основанного на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах, позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения на земной поверхности с вероятностью правильного обнаружения, близкой к единице, при небольшой вероятности ложных тревог.

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

### Введение

На сегодняшний день актуальной является задача контроля загрязнений нефтью и нефтепродуктами водной и земной поверхностей.

Наиболее перспективными методами контроля с целью обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды являются методы лазерного зондирования. К настоящему времени разработаны и созданы различные лазерные (в основном флуоресцентные и спектрофотометрические) методы и приборы для дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности (см., например, [1–8]).

Решение аналогичной задачи для земной поверхности является гораздо более сложным из-за трудности обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности на фоне других природных образований и элементов ландшафта.

На сегодняшний день для обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности используют лабораторные методы, основанные на химическом анализе или флуоресцентной диагностике специально подготовленных проб загрязненных почв. Задача дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности на сегодняшний день не решена, хотя и является актуальной.

Причиной нефтяных загрязнений на земной поверхности в большинстве случаев являются аварии и утечки на базах горюче-смазочных материалов, пунктах заправки и перекачки топлива, утечки из трубопроводов и т.п. Существующие в настоящее время системы контроля, например, на нефтепроводах (акустические, параметрические системы; системы виброакустического мониторинга; системы, использующие измерение проводимости изоляционного покрытия трубопровода и др.) обеспечивают регистрацию крупных утечек и имеют предел чувствительности, который составляет около 1% производительности трубопровода. Утечки с низкой интенсивностью (менее 1%) такие системы не регистрируют. Одним из вариантов системы обнаружения утечек с низкой интенсивностью является система дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений с летательного аппарата (например, беспилотного).

Ниже рассматривается дистанционный метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах.

К настоящему времени авторами накоплены экспериментальные данные (на длине волны возбуждения флуоресценции 266 нм) по спектрам флуоресценции чистых нефтепродуктов (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

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

чернозема, глины, песка), растительности (листья деревьев, мох, салат, трава), почвы (чернозем, 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.

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. Подсистема регистрации излучения построена на основе полихроматора и высокочувствительного матричного детектора с усилителем яркости на основе ЭОП и позволяла регистрировать спектры флуоресценции в диапазоне 295–700 нм. Перед измерениями проводилась калибровка измерительной аппаратуры (см. [9]).

Проба незагрязненных подстилающих поверхностей (почвы, растительности и асфальта) помещалась в чашку Петри, и проводилось измерение. При измерении спектров воды, для предотвращения излучения флуоресценции самой чашки, на дно чашки

сначала помещали почву (чернозем, глину или песок), которая препятствовала прохождению излучения до чашки и ее флуоресценции, а потом наливали воду. Таким образом, моделировались естественные лужи на черноземе, глине и песке. Нефтяные загрязнения получали тем же путем: помещали пробы подстилающих поверхностей в чашку Петри и поливали их нефтепродуктами. При измерении спектров флуоресценции чистых нефтепродуктов вещество наливали в кювету толстым слоем, чтобы лазерное излучение полностью поглощалось и не достигало дна кюветы.

На рис. 1–4 приведены нормированные (на сигнал упругого рассеяния на длине волны 266 нм) спектры флуоресценции разных типов загрязнений.

Отметим, что вопрос о нормировке спектров флуоресценции является непростым и неоднозначным. Идеальной нормировкой была бы нормировка на сигнал комбинационного рассеяния на молекулах воды (см., например, [1]). Однако для задачи обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности суши ее использовать неудобно — на трассе зондирования (например, в пустыне или на плоскогорье) воды

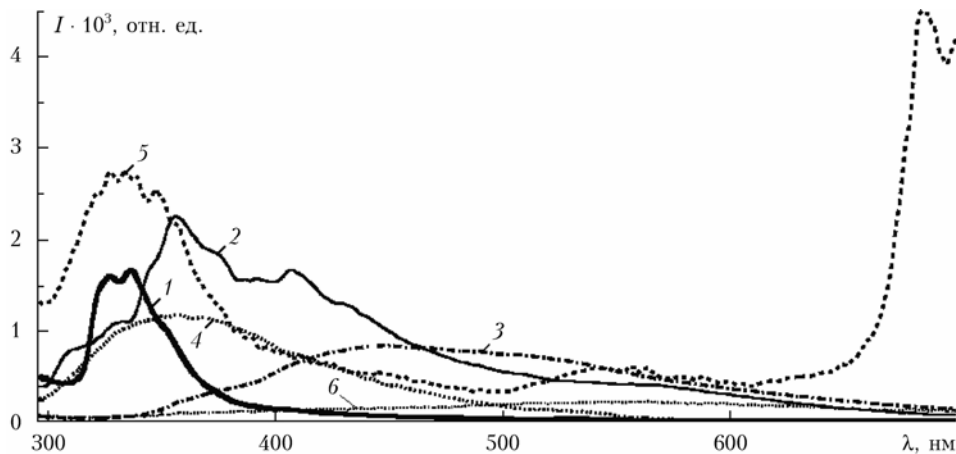


Рис. 1. Спектры флуоресценции нефтепродуктов, воды, хлорофилла и асфальта: 1 — бензин А-80 на песке; 2 — масло машинное отработанное на глине; 3 — нефть альметьевская на торфе; 4 — вода с взвесью чернозема; 5 — мох; 6 — асфальт

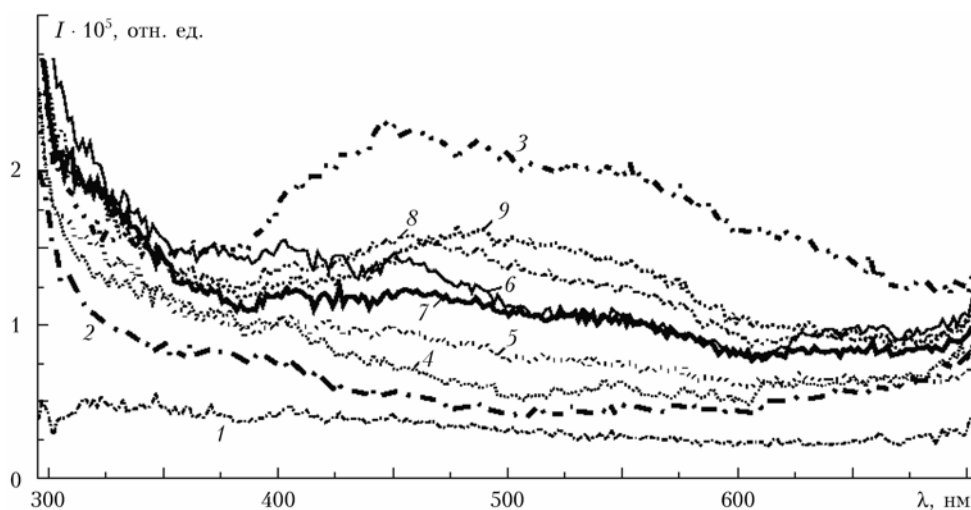


Рис. 2. Спектры флуоресценции почв: 1 — чернозем; 2 — глина; 3 — известняк; 4 — песок; 5 — песчаная почва; 6 — торф; 7 — почва из соснового бора; 8 — почва из березовой рощи; 9 — почва из дубравы

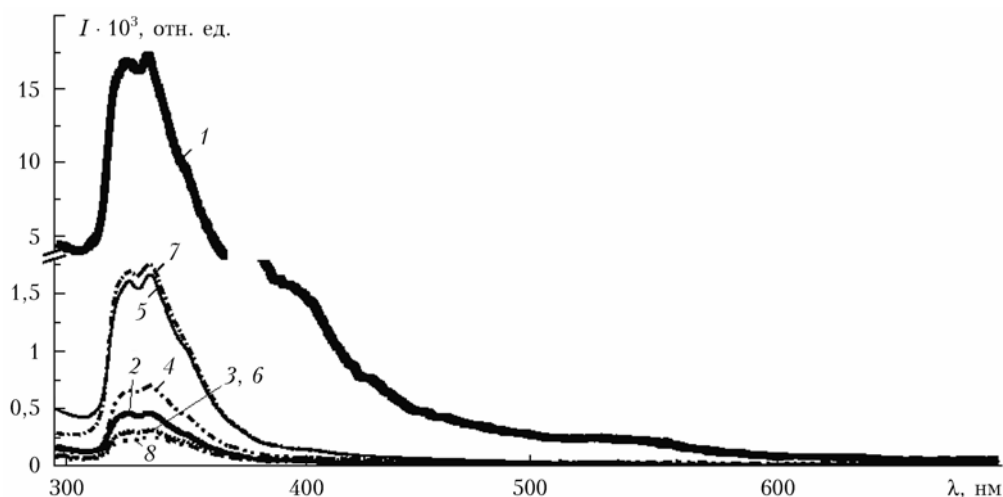


Рис. 3. Спектры флуоресценции чистого бензина и бензина, разлитого на разных поверхностях: 1 – чистый бензин А-80; 2 – бензин А-80, разлитый на черноземе; 3 – на глине; 4 – на известняке; 5 – на песке; 6 – на песчаной почве; 7 – на торфе; 8 – на почве из соснового бора

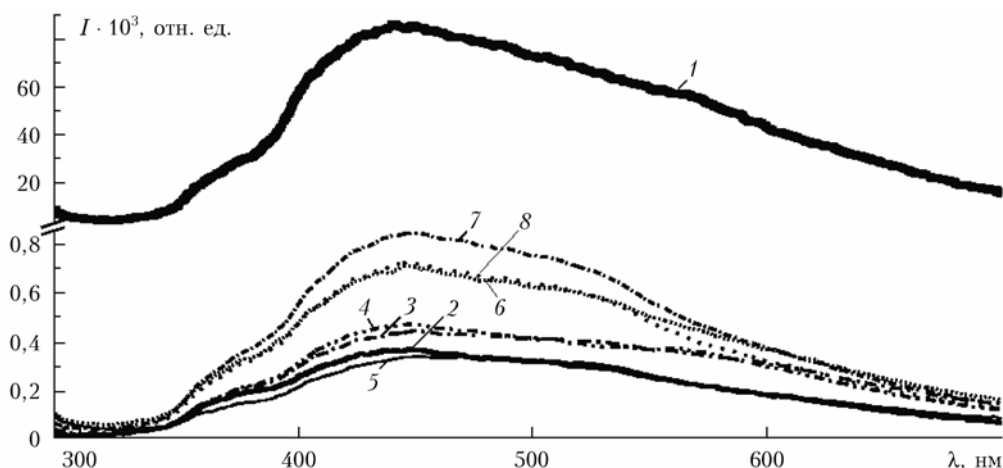


Рис. 4. Спектры флуоресценции чистой нефти и нефти, разлитой на разных поверхностях: 1 – чистая нефть альметьевская; 2 – нефть альметьевская, разлитая на черноземе; 3 – на глине; 4 – на известняке; 5 – на песке; 6 – на песчаной почве; 7 – на торфе; 8 – на почве из соснового бора

может не быть вообще. Единственным приемлемым (хотя и не идеальным) вариантом, позволяющим, с одной стороны, убрать зависимость от расстояния до зондируемого объекта, а с другой – не исказить форму измеренного спектра флуоресценции, является использование для нормировки сигнала упругого рассеяния излучения лазера, возбуждающего флуоресценцию зондируемого объекта.

Из рис. 1–4 видно, *во-первых*, что интенсивность флуоресценции для почв гораздо меньше (на 2 порядка), чем для нефтепродуктов, и спектры имеют случайную структуру, близкую к шумовой; *во-вторых*, что интенсивность флуоресценции для растительности, воды и асфальта может быть сравнима с интенсивностью флуоресценции нефтепродуктов, однако их спектры флуоресценции заметно отличаются от спектров флуоресценции растительности, воды и асфальта (наиболее близкими являются спектры флуоресценции нефти и асфальта).

Анализ спектров флуоресценции показывает, что алгоритм обнаружения нефтяных загрязнений на

земной поверхности должен состоять из двух этапов. *Первый этап* – пороговый алгоритм. Если интенсивность флуоресцентного сигнала меньше некоторой пороговой, то исследуемый элемент земной поверхности относят к почвам (т.е. к «земной поверхности»). Если интенсивность флуоресцентного сигнала выше пороговой, то переходят ко *второму этапу* – анализу спектров флуоресценции. На этом этапе, используя различия в спектрах флуоресценции нефтепродуктов, воды, растительности (и асфальта для населенной местности), относят исследуемый элемент поверхности к «нефтяному загрязнению» или к «земной поверхности».

Для обеспечения первого этапа алгоритма обнаружения (определения порогового значения, обеспечивающего отнесение или неотнесение исследуемого элемента поверхности к почвам) проводились нормировка интенсивности сигнала флуоресценции на сигнал упругого рассеяния на длине волны 266 нм и математическое моделирование для определения оптимального (с точки зрения вероятности правиль-

ного обнаружения нефтяных загрязнений) порога величины относительного сигнала флуоресценции.

Для обеспечения второго этапа алгоритма обнаружения проводился анализ спектров флуоресценции с целью исследования отличий спектров флуоресценции нефтепродуктов от спектров флуоресценции воды, растительности и асфальта.

С точки зрения практической реализации измерительной аппаратуры наиболее простым вариантом является использование регистрации флуоресцентного излучения в нескольких узких спектральных диапазонах. Вопрос о выборе из широкого спектра флуоресценции лишь некоторого числа регистрируемых узких спектральных диапазонов решался с использованием экспериментально измеренных спектров флуоресценции и математического моделирования.

Экспериментально измеренные спектры флуоресценции оцифровывались, математически обрабатывались и заносились в специально разработанную в СУБД MySQL реляционную базу данных. В базу данных к настоящему времени записано около 870 экспериментально измеренных спектров флуоресценции.

Математическое моделирование показало, что при использовании двух спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного сигнала вероятность правильного обнаружения невелика (для разных алгоритмов обработки 50–70%). Использование трех спектральных диапазонов позволяет обеспечить вероятность правильного обнаружения более 95%. Использование четырех или даже пяти спектральных диапазонов потенциально позволяет еще больше повысить вероятность правильного обнаружения. Однако такое увеличение числа спектральных каналов обоснованно, если система предназначена не только для обнаружения, но и для классификации (конечно, простейшей – нефть, легкие и тяжелые нефтепродукты) нефтепродуктов, т.е. когда четвертая, пятая длины волн изначально нужны для задачи классификации, но могут быть использованы и для повышения вероятности правильного обнаружения.

Таким образом, результаты математического моделирования показывают, что для задачи обнаруже-

ния нефтепродуктов на фоне растительности, воды и асфальта можно ограничиться тремя узкими спектральными диапазонами (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 (спектральные диапазоны выбирались для обеспечения 2-го этапа алгоритма по максимуму расстояний между классами «нефтяное загрязнение» и «земная поверхность» в пространстве выбранных классифицирующих признаков). Эти спектральные диапазоны также достаточны и для обеспечения 1-го этапа алгоритма.

Этапы алгоритма обнаружения следующие.

*1-й этап.* Пороговый алгоритм. Сравнивается сумма интенсивностей флуоресценции (нормированных на сигнал упругого рассеяния на длине волн 266 нм) в трех спектральных каналах с пороговым значением

$$I(\lambda_1) + I(\lambda_2) + I(\lambda_3) \leq K1 \text{ для «почв»};$$

$$I(\lambda_1) + I(\lambda_2) + I(\lambda_3) > K1 \text{ для «не почв»},$$

где  $K1 = 3 \cdot 10^{-4}$ .

*2-й этап.* Для анализа формы спектров флуоресценции используются два классифицирующих признака –  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1)$ ,  $I(\lambda_3)/I(\lambda_1)$  и две пороговые величины –  $K2 = 1,8$  (для отношения  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1)$ ) и  $K3 = 1,75$  (для отношения  $I(\lambda_3)/I(\lambda_1)$ ):

$$\frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \geq K2 \wedge \frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_1)} \geq K3$$

для случая «нефтяное загрязнение»,

$$\frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} < K2 \vee \frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_1)} < K3$$

для случая «земная поверхность».

Исследуемые вещества и границы классов («нефтяное загрязнение» и «земная поверхность») в двумерном пространстве выбранных классифицирующих признаков представлены на рис. 5.

Для оценки эффективности описанного алгоритма находились вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности

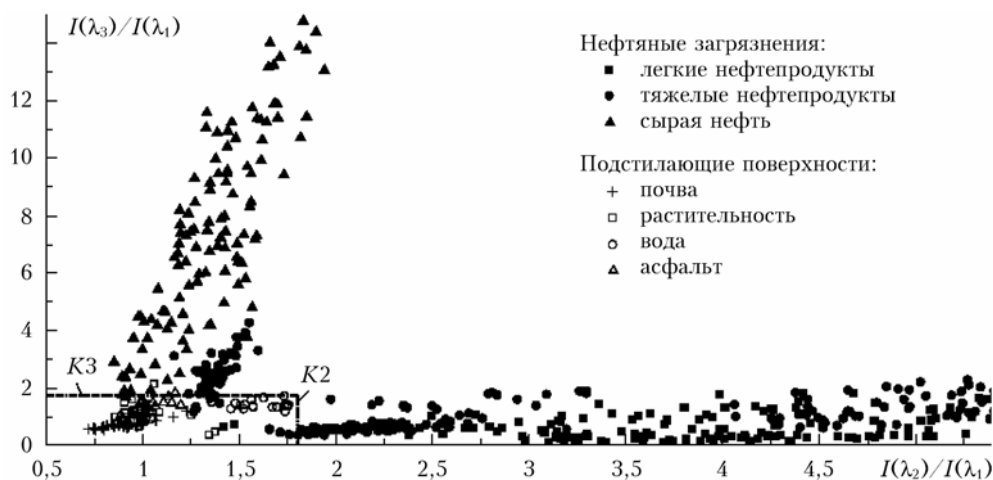


Рис. 5. Исследуемые вещества и границы классов в двумерном пространстве классифицирующих признаков

Таблица 1

## Вероятность правильного обнаружения

Вероятность	Легкие нефтепродукты (керосин, бензины)	Тяжелые нефтепродукты (дизельное топливо, масло)	Сырая нефть	Все нефтепродукты
Правильное обнаружение, %	98,87	95,93	99,25	97,59

Таблица 2

## Вероятность ложной тревоги

Вероятность	Различные почвы	Растительность	Вода	Асфальт	Все поверхности
Ложная тревога, %	0	2,27	0	5,71	1,06

(вероятность обнаружения нефтяных загрязнений, когда они действительно присутствуют) и вероятность ложных тревог (вероятность обнаружения нефтяных загрязнений, когда их в действительности нет) (табл. 1 и 2).

Результаты математического моделирования показывают, что вероятность правильного обнаружения (по всем исследованным нефтепродуктам на земной подстилающей поверхности) составляет 97,59%, а вероятность ложных тревог (по всем исследованным подстилающим поверхностям) – 1,06%.

Таким образом, результаты математического моделирования показывают, что метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах, позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения с вероятностью правильного обнаружения, близкой к единице, при небольшой вероятности ложных тревог.

1. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. *Оптико-физические средства исследования океана* / Под ред. Е.Г. Пащенко. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.
3. *Орлов В.М., Самохвалов И.В., Белов М.Л., Шаманаев В.С., Клишкин В.М., Белохвостиков А.В., Пеннер И.Э., Сафин Р.Г., Юдовский А.Б.* Дистанционный контроль верхнего слоя океана. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.

4. *Власов Д.В., Цитенюк Д.Ю., Вартапетов С.К., Букреев В.С., Обидин А.Э.* Исследование возможности применения эксимерного Кг–F-лазера в лидарных экспериментах по детектированию нефтяных пленок на поверхности воды // *Оптика атмосф.* 1990. Т. 3, № 11. С. 1224–1225.
5. *Клишкин В.М., Соколов В.Г., Федорищев В.Н.* Новые возможности дистанционного анализа нефтепродуктов на поверхности вод // *Оптика атмосф. и океана.* 1993. Т. 6, № 2. С. 189–204.
6. *Клишкин 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.
7. *Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И., Федотов Ю.В., Смирнова О.А., Хрусталева А.М.* Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности с помощью двухспектрального метода // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 10. С. 872–874.
8. *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 // *Вестн. МГТУ. Сер. Приборостроение.* 2010. № 2. С. 39–47.
9. *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.* 2011. № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/256187.html>

**Yu.V. Fedotov, O.A. Matrosova, M.L. Belov, V.A. Gorodnichev. Method of detection of oil pollution on the earth's surface based on fluorescence radiation recording within three narrow spectral bands.**

The problem of detection of oil pollution on the earth's surface is considered. The results of experimental investigations of laser-induced fluorescence spectra of petroleum products, and petroleum products on earth's surfaces are presented. It is shown that the use of a laser method, based on fluorescence radiation recording within three narrow spectral bands, allows detection of oil pollution on the earth's surfaces with a probability of correct classification close to unity, and small probability of false alarm.