УДК 535.372

На правах рукописи

Матросова Ольга Александровна

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОСНОВАННЫЕ НА ЯВЛЕНИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Городничев Виктор Александрович,** доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Носов Виктор Николаевич,** доктор технических наук, заведующий лабораторией института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

Прилепский Борис Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ОКБ высокоэнергетических лазеров «Гранат» им. В.К. Орлова»

Ведущая организация: Томский государственный университет, г. Томск.

Защита диссертации состоится «30» октября 2013 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19

Автореферат разослан «17» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19
кандидат физико-математических наук Семеренко Д.А.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2034325
Матросова О.А. Методы кон

2851

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ежегодно аварии, связанные с добычей, транспортировкой и переработкой нефти, наносят непоправимый вред окружающей среде. По мере увеличения потребности мировой экономики в нефти число подобных аварий будет только расти. Поэтому разработка методов контроля нефтяных загрязнений является важной проблемой экологического мониторинга. На сегодняшний день существует множество методов контроля нефтяных загрязнений водной поверхности. В то же время, методы контроля нефтяных загрязнений земной поверхности проработаны в значительно меньшей мере и требуют дальнейших исследований.

Контроль нефтяных загрязнений земной поверхности должен включать в себя обнаружение и классификацию нефтяных загрязнений. Своевременное обнаружение нефтяных загрязнений позволяет принять меры к устранению причины аварии и тем самым уменьшить наносимый ущерб. Классификация нефтяных загрязнений позволяет выявить источник загрязнения в районах со сложной нефтепромышленной инфраструктурой и выбрать наиболее рациональный метод устранения нефтяного загрязнения, позволяющий минимизировать ущерб.

В настоящее время для контроля нефтяных загрязнений земной поверхности в основном используются контактные методы мониторинга. Данная группа методов имеет ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются длительный интервал времени, необходимый для анализа, а также невозможность оперативного мониторинга больших территорий. Дистанционные методы лишены указанных недостатков и позволяют осуществлять оперативный контроль обширных территорий, что особенно важно для задачи мониторинга протяженных участков трубопроводов, особенно, в малонаселенных и труднодоступных районах.

Наиболее перспективным дистанционным методом контроля нефтяных загрязнений является метод, основанный на явлении лазерно-индуцированной флуоресценции.

К настоящему времени разработан ряд методов и созданы приборы для дистанционного обнаружения и классификации нефтяных загрязнений водной поверхности, использующие явление лазерно-индуцированной флуоресценции.

Работы в этом направлении проводились в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томском государственном университете, в МГУ им. М.В. Ломоносова и в других организациях. Основы построения лазерных флуориметров для контроля нефтяных загрязнений водной поверхности были заложены в работах В.В. Фадеева, R.Reuter и др. Существенный вклад в данную область внесли также работы И.В. Самохвалова, В.М. Климкина, В.Н. Федорищева, Г.С. Карабашева,

М Г Т У
им. Н Э. Баумана
Библиотека

С.П. Пацаевой, С.М.Глушкова, В.В. Чубарова, А.П. Желвакова, Д.В. Власова, Р. Межериса, R.A. O'Neil, G. Cecchi и др.

Вместе с тем, методы обнаружения и классификации нефтяных загрязнений земной поверхности при помощи явления лазерно-индуцированной флуоресценции на сегодняшний день недостаточно проработаны. Данное обстоятельство связано, прежде всего, с тем, что задача мониторинга нефтяных загрязнений земной поверхности является значительно более сложной, чем задача контроля нефтяных загрязнений водной поверхности и имеет специфические особенности. Так, сигнал флуоресценции нефтяных загрязнений земной поверхности является заметно более слабым и становится сравним с флуоресценцией естественных образований, располагающихся на земной поверхности – таких как растительность, например. Кроме того, на интенсивность флуоресценции влияют такие факторы как структура земной поверхности, тип грунта и т.д. При этом для достижения высоких вероятностей обнаружения и классификации необходимо использовать информацию о спектре флуоресценции нефтяных загрязнений и незагрязненных земных поверхностей.

Таким образом, актуальной является задача разработки дистанционных методов контроля нефтяных загрязнений земной поверхности, включающих их обнаружение и классификацию, которые дают информацию для выявления источника загрязнения и принятия мер по оперативному устранению последствий загрязнения.

Цель диссертационной работы и задачи исследований

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов контроля нефтяных загрязнений земной поверхности, основанных на явлении лазерно-индуцированной флуоресценции.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Экспериментально исследованы спектры флуоресценции незагрязненных и загрязненных нефтепродуктами земных поверхностей с целью получения данных для разработки методов контроля нефтяных загрязнений.
2. Разработан дистанционный метод обнаружения нефтяных загрязнений земной поверхности, основанный на явлении лазерно-индуцированной флуоресценции.
3. Разработан дистанционный метод классификации типов нефтяных загрязнений земной поверхности.
4. Исследованы характеристики разработанных методов контроля нефтяных загрязнений путем численного моделирования с использованием экспериментальных данных.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы флуоресцентной диагностики, теории вероятности и математической

статистики, корреляционного анализа, теории распознавания образов, теории планирования эксперимента.

Научная новизна исследований

1. Впервые создан банк данных спектров флуоресценции незагрязненных и загрязненных различными нефтепродуктами земных поверхностей, содержащий 870 спектров.
2. Показано, что регистрация интенсивности флуоресцентного излучения в трех спектральных диапазонах и интенсивности лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью, обеспечивает уверенное обнаружение нефтяных загрязнений земной поверхности.
3. Показано, что регистрация флуоресцентного излучения в пяти спектральных диапазонах и интенсивности лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью, позволяет определить тип нефтяного загрязнения земной поверхности (легкие, тяжелые нефтепродукты и сырая нефть).

Научные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установлено, что незагрязненные участки земной поверхности и участки, загрязненные различными нефтепродуктами, имеют отличия как в уровне интенсивности, так и в спектрах флуоресценции.
2. Экспериментально показано, что спектр флуоресценции нефтяных загрязнений слабо зависит от типа грунта, однако существенно зависит от типа нефтепродукта.
3. Регистрация интенсивности флуоресценции в трех спектральных диапазонах и интенсивности лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью, обеспечивает уверенное обнаружение нефтяных загрязнений земной поверхности.
4. Классификация типа нефтепродукта (легкие, тяжелые нефтепродукты и сырая нефть), которым загрязнена земная поверхность, обеспечивается при регистрации интенсивности флуоресценции в пяти спектральных диапазонах и интенсивности лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке перспективных образцов дистанционных лазерных флуориметров для контроля нефтяных загрязнений земной поверхности. Созданный банк данных спектров флуоресценции незагрязненной и загрязненной нефтепродуктами земной поверхности может быть использован при разработке имитационных моделей систем экологического мониторинга.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты работы использованы в НИР «Разработка методологии дистанционного лазерного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности» и в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «Проектирование лазерных систем экологического мониторинга», что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на XVII (г. Томск, 2011 г.) и XVIII (г. Иркутск, 2012 г.) международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», на V международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (г. Томск, 2012 г.), а также на XII (Кипр, г. Ларнака, 2010 г.), XIII (Испания, о. Майорка, 2011 г.) и XIV (Португалия, курорт Алгарве, 2012 г.) международных научно-технических конференциях «Медико-технические технологии на страже здоровья».

Публикации

Результаты работы изложены в 7 научных статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 9 тезисах докладов на международных научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 99 библиографических ссылок. Общий объем работы – 176 страниц машинописного текста, включая 66 рисунков и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность дистанционного контроля нефтяных загрязнений земной поверхности, сформулированы цель и задачи работы, показаны ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены существующие методы контроля нефтяных загрязнений водной и земной поверхностей, отмечены их достоинства и недостатки, сделан вывод о том, что наиболее перспективно для решения задач дистанционного обнаружения и классификации нефтяных загрязнений земной поверхности с авиационного носителя использовать метод, основанный на явлении лазерно-индуцированной флуоресценции.

Во второй главе отмечается, что в литературных источниках отсутствует информация о спектрах флуоресценции нефтяных загрязнений земной поверхности, которые могли бы быть использованы для разработки, исследования и верификации новых методов обнаружения и классификации нефтяных загрязнений. Для исследования спектров флуоресценции земных поверхностей и нефтяных загрязнений была создана экспериментальная установка, позволяющая измерять спектры флуоресценции в диапазоне длин волн от 295 до 740 нм со спектральным разрешением 5 нм, а также интенсивность лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью, на длине волны возбуждения 266 нм (которое далее будем называть рассеянным излучением). Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

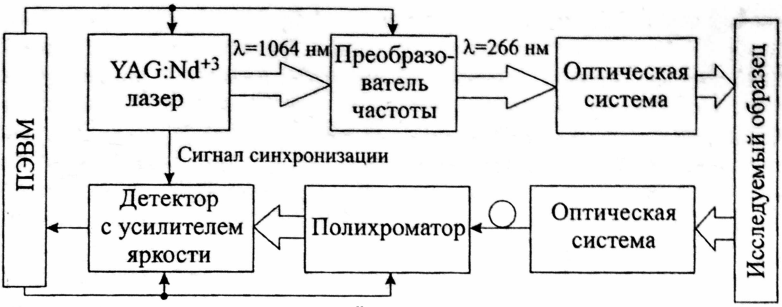


Рис. 1.
Схема экспериментальной установки

Выбранный диапазон длин волн регистрации интенсивности флуоресценции от 295 до 740 нм обеспечил возможность измерения спектра флуоресценции для различных типов нефтепродуктов (легких, тяжелых нефтепродуктов и сырых нефтей).

Экспериментальные исследования спектров флуоресценции на созданной установке включали следующие этапы: калибровку оборудования, подготовку экспериментальных образцов, измерение спектров флуоресценции и обработку результатов измерений.

Подготовка измерительного оборудования после ее прогрева в течение одного часа заключалась в калибровке полихроматора по длине волны калибровочного источника света – ртутно-аргоновой лампы с линейчатым спектром, измерении уровня фоновых шумов, а также оценке неравномерности чувствительности детектора при помощи калибровочного источника света с непрерывном спектром излучения.

В качестве нефтепродуктов для экспериментальных исследований были выбраны несколько типов бензинов с различными октановыми числами марок А80, А92, А95 и А98, керосин, дизельное топливо, машинное масло – как новое, так и отработанное – и нефть Альметьевского месторождения. В ходе экспериментальных исследований использовались 12 типов грунтов (в том числе – чернозем, глина, суглинок, торф, известняк, песок). Кроме того, были исследованы спектры флуоресценции нескольких образцов растительности, воды и асфальта.

При измерениях спектров флуоресценции нефтяных загрязнений в чашку Петри помещался слой грунта толщиной от 1 до 1,5 см. Затем туда наливался исследуемый нефтепродукт в количестве от 10 до 30 мл. При этом площадь загрязнения составляла от 15 до 20 $см^2$.

Результаты измерения спектров флуоресценции $I(\lambda)$ нефтепродуктов, незагрязненных земных поверхностей и загрязненных нефтепродуктами земных поверхностей представлены на рис. 2 – 4.

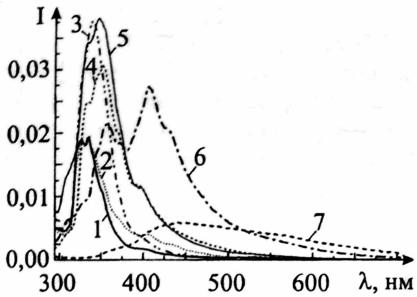


Рис. 2.
Спектры флуоресценции различных нефтепродуктов: 1 – бензин А80; 2 – бензин А92; 3 – керосин; 4 – дизельное топливо; 5 – масло машинное; 6 – масло машинное отработанное; 7 – нефть

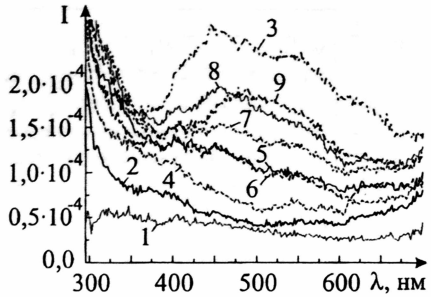


Рис. 3.
Спектры флуоресценции различных незагрязненных грунтов: 1 – чернозем; 2 – глина; 3 – известняк; 4 – песок; 5 – песчаная почва; 6 – торф; 7 – почва из соснового бора; 8 – почва из березовой рощи; 9 – почва из дубравы

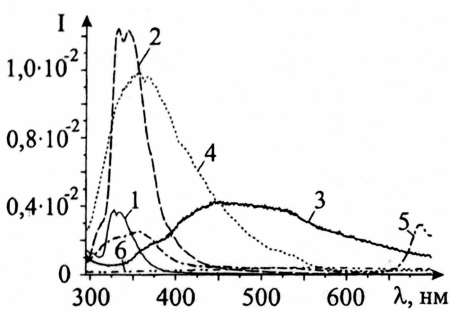


Рис. 4.
Спектры флуоресценции: 1 – глина, загрязненная бензином; 2 – чернозем, загрязненный дизельным топливом; 3 – песок, загрязненный нефтью; 4 – вода со взвесью чернозема; 5 – листья деревьев; 6 – асфальт

По результатам экспериментальных исследований был сформирован банк данных спектров флуоресценции незагрязненных и загрязненных нефтепродуктами земных поверхностей, который содержит информацию о 870 исследованных образцах. Для каждого экспериментального образца в банке данных имеется информация об интенсивности излучения флуоресценции на длинах волн от 295 до 700 нм, интенсивности рассеянного излучения и информация об условиях проведения эксперимента.

Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что уровень интенсивности флуоресценции незагрязненных грунтов примерно на два порядка меньше уровня интенсивности флуоресценции нефтяных загрязнений, а спектр флуоресценции незагрязненных грунтов является

вариабельным. Уровень интенсивности флуоресценции незагрязненных образцов растительности, воды и асфальта сравним с уровнем флуоресценции нефтяных загрязнений, однако спектры флуоресценции существенно отличаются. Эти различия позволяют разработать методы обнаружения нефтяных загрязнений земной поверхности, основанные на анализе интенсивности и спектра лазерно-индуцированной флуоресценции. Разные типы нефтяных загрязнений имеют различия в спектре флуоресценции, а типы грунтов не оказывают существенного влияния на спектры флуоресценции нефтепродуктов. Это приводит к возможности разработки методов классификации нефтяных загрязнений на различных земных поверхностях.

В третьей главе описаны разработанные методы обнаружения нефтяных загрязнений земной поверхности, основанные на анализе спектра лазерно-индуцированной флуоресценции.

Традиционным методом обнаружения нефтяных загрязнений водной поверхности по спектрам флуоресценции является корреляционный анализ. Использование этого метода для обнаружения нефтяных загрязнений земной поверхности показало, что существенным недостатком данного метода является высокая вероятность ложного обнаружения нефтяного загрязнения, обусловленная вариабельностью спектров флуоресценции незагрязненных грунтов. Так как интенсивность флуоресценции незагрязненных грунтов примерно на два порядка меньше интенсивности флуоресценции загрязненных нефтепродуктами грунтов, то для уменьшения вероятности ложного обнаружения целесообразно перед проведением корреляционного анализа спектра флуоресценции предварительно оценить величину интенсивности флуоресценции. Таким образом, необходимо полученную оценку нормированной интенсивности флуоресценции сравнить с пороговым значением для исключения ложного обнаружения загрязненного грунта. Нормировка интенсивности флуоресценции осуществляется по величине интенсивности рассеянного излучения. Если нормированная интенсивность флуоресценции меньше порогового значения, то принимается решение об отсутствии нефтяного загрязнения. В противном случае необходимо по спектрам флуоресценции установить факт наличия в поле зрения флуориметра нефтяного загрязнения земной поверхности или участка незагрязненной земной поверхности с находящимся на нем сильно флуоресцирующей растительностью, воды с органическими включениями или асфальта. Для этого рассчитываются коэффициенты корреляции зарегистрированного спектра с эталонными спектрами этих поверхностей. Полученные значения коэффициентов корреляции позволяют принять решение о наличии в поле зрения флуориметра одной из этих поверхностей.

Такой алгоритм принятия решения позволил уменьшить вероятность ложного обнаружения нефтяного загрязнения до значения 0,07 при вероятности правильного обнаружения 0,97. Дальнейшее уменьшение

значения вероятности ложного обнаружения может быть достигнуто путем оптимизации длин волн флуоресценции, для которых определяются отсчеты интенсивности флуоресценции и рассчитываются коэффициенты корреляции. Так, например, легкие и тяжелые нефтепродукты сильно флуоресцируют в диапазоне длин волн от 300 до 400 нм, сырая нефть – от 350 до 600 нм. Следовательно, расчет коэффициентов корреляции в каждом диапазоне позволит уменьшить влияние шумов на рассчитываемые значения коэффициентов корреляции и уменьшить вероятность ложного обнаружения. Вместе с тем, применение корреляционного анализа для обнаружения нефтяного загрязнения земной поверхности требует больших временных затрат на проведение измерений и обработку отсчетов для принятия конечного решения.

Уменьшение временных затрат на проведение измерений и обработку отсчетов возможно путем перехода от регистрации всего спектра флуоресценции к регистрации интенсивности флуоресценции в нескольких специально выбранных спектральных диапазонах:

$$I_i = \int_{\lambda_i - \Delta\lambda_i/2}^{\lambda_i + \Delta\lambda_i/2} I_0(\lambda)d\lambda, \qquad (1)$$

где $I_0(\lambda)$ – спектр флуоресценции, λ_i – центральная длина волны i-го спектрального диапазона, $\Delta\lambda_i$ – ширина i-го спектрального диапазона, $i = 1, \ldots, N_{об}$, $N_{об}$ – число выбранных спектральных диапазонов, I_i – интенсивность флуоресценции в i-ом спектральном диапазоне.

Очевидно, что для упрощения технической реализации флуориметра необходимо использовать минимальное число диапазонов $N_{об}$. Анализ измеренных спектров флуоресценции показал, что в качестве признака обнаружения можно рассматривать отношение интенсивностей флуоресценции в различных спектральных диапазонах I_i и I_j, $i \neq j$, $i, j = 1, \ldots, n$, где n – общее число доступных для анализа спектральных диапазонов, используя коэффициент

$$\alpha_{ij} = \frac{I_i}{I_j}. \qquad (2)$$

Проведенный анализ показал, что для случая $\Delta\lambda_i = \text{const}\big|_{\forall i} = \Delta\lambda$ целесообразно выбрать $\Delta\lambda = 8$ нм. При меньших значениях $\Delta\lambda$ уменьшается величина энергии принимаемого сигнала флуоресценции, при больших – ухудшаются характеристики обнаружения вследствие снижения спектрального разрешения.

В условиях, когда число спектральных диапазонов $N_{об}$ мало и составляет несколько единиц, более результативны эвристические алгоритмы выбора квазиоптимального числа $N_{об}$.

Разработанный алгоритм определения $N_{об}$ заключается в минимизации

значения функционала $R = \Im(N_{об}, \lambda_1, ..., \lambda_{N_{об}})$, характеризующего долю «пересечения» классов незагрязненных и загрязненных земных поверхностей в одномерном пространстве признаков, определяемых в соответствии с (2). Для $N_{об} = 2$ доля «пересечения» классов составила 0,32, для $N_{об} = 3$ – 0,16, при $N_{об} = 4$ – 0,13. При дальнейшем увеличении $N_{об}$ пересечение классов уменьшается незначительно.

Таким образом, используя измеренные спектры флуоресценции, удалось показать, что регистрация интенсивности флуоресценции в трех спектральных диапазонах ($\lambda_1 = 314$ нм; $\lambda_2 = 335$ нм и $\lambda_3 = 400$ нм при $\Delta\lambda = 8$ нм) обеспечивает уверенное обнаружение нефтяных загрязнений земной поверхности. Тогда целесообразно конечное решение принимать в двумерном пространстве признаков:

$$\alpha_{21} = \frac{I_2}{I_1}, \tag{3}$$

$$\alpha_{31} = \frac{I_3}{I_1}. \tag{4}$$

Значения признаков α_{21} и α_{31}, определенные по измеренным спектрам флуоресценции образцов, представлены на рис. 5.

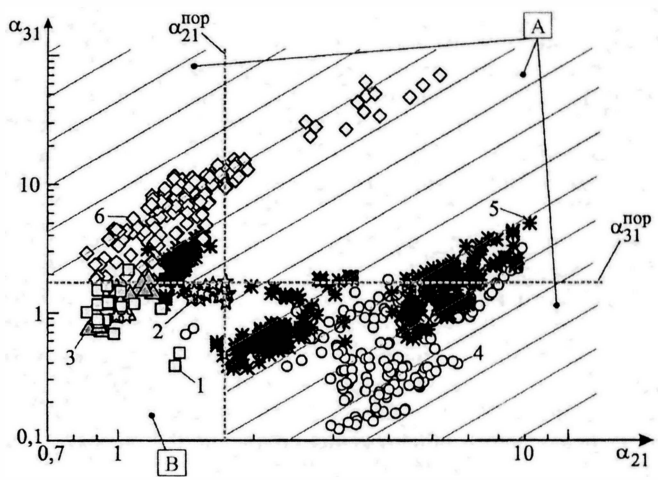


Рис. 5.

Значения признаков α_{21} и α_{31}, определенные по спектрам флуоресценции образцов: 1 – растительность; 2 – вода; 3 – асфальт; 4 – загрязнения легкими нефтепродуктами; 5 – загрязнения тяжелыми нефтепродуктами; 6 – загрязнения сырой нефтью; A – области принятия решения о наличии нефтяного загрязнения; B – область принятия решения об отсутствии нефтяного загрязнения

Для установления факта присутствия незагрязненных грунтов в поле зрения флуориметра, как и в случае метода обнаружения, основанного на корреляционном анализе, целесообразно использовать оценку интенсивности флуоресценции во всех выбранных $N_{об}$ спектральных диапазонах:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{N_{об}} I_i}{\tilde{I}}, \qquad (5)$$

где $\tilde{I}$ – интенсивность рассеянного излучения.

Таким образом, решение **С** об обнаружении нефтяного загрязнения на земной поверхности принимается в соответствии с выражением:

$$\mathbf{C} \rightarrow \left(\alpha \geq \alpha^{пор}\right) \cap \left((\alpha_{21} \geq \alpha_{21}^{пор}) \cup (\alpha_{31} \geq \alpha_{31}^{пор})\right) \qquad (6)$$

Для практического применения разработанного метода обнаружения важно правильно выбрать пороговые значения $\alpha^{пор}$, $\alpha_{21}^{пор}$, $\alpha_{31}^{пор}$. Предложено значения $\alpha^{пор}$, $\alpha_{21}^{пор}$, $\alpha_{31}^{пор}$ определять по результатам численного моделирования принятия решения при заданных модельных пороговых значениях этих величин. Для численного моделирования использовались спектры флуоресценции из сформированной базы данных. При этом все измеренные спектры флуоресценции были разделены на две части - для определения пороговых значений и для тестирования алгоритма принятия решения. Определенные в результате численного моделирования пороговые значения обеспечивают вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений земной поверхности 0,96 при вероятности ложного обнаружения не более 10^{-2}.

Верификация метода обнаружения нефтяных загрязнений земной поверхности, выполненная по спектрам флуоресценции из различных литературных источников, подтвердила его работоспособность. При верификации использовались спектры флуоресценции растительности (водоросль хлорелла, водоросль хлорококкум, кукуруза), воды (дистиллированная, очищенная и др.) и нефтепродуктов (бензин, керосин, дизельное топливо, машинное масло, нефть Ливийская, нефть Каспийская). Вероятность правильного обнаружения составила 0,9, вероятность ложного обнаружения – 0,1.

Таким образом, использование для построения пространства признаков величины интенсивности флуоресценции в трех спектральных диапазонах и величины интенсивности лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью, позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения с вероятностью правильного обнаружения 0,96 при вероятности ложного обнаружения не более 10^{-2}. Энергетический расчет флуориметра, реализующего разработанный метод обнаружения, показал, что обнаружение

загрязнений возможно в условиях прозрачной атмосферы с высоты около 100 м при энергии лазерного импульса 0,75 мДж и диаметре приемной оптической системы 0,15 м.

В четвертой главе описаны разработанные методы классификации типов нефтяных загрязнений земной поверхности, основанные на анализе спектра лазерно-индуцированной флуоресценции.

Классификация типов нефтяных загрязнений позволяет выявить источник загрязнения и выбрать наиболее рациональный метод устранения нефтяного загрязнения, обеспечивающий минимизацию ущерба.

Для решения задачи классификации нефтяных загрязнений необходимо определить классы, их элементы, а также разработать правило классификации.

Число классов N, на которые целесообразно разделить нефтяные загрязнения, было определено в результате исследования влияния числа классов и их состава на величину средней вероятности правильной классификации. Так, при исходном числе классов N, равном 9, средняя вероятность правильной классификации составила 0,67, при $N = 5$ – 0,88, при $N = 4$ – 0,90, а при $N = 3$ – 0,98. Для классификации загрязнений были выбраны три класса: легкие нефтепродукты, тяжелые нефтепродукты и сырая нефть. Необходимо отметить, что аналогичный вывод был сделан рядом исследователей применительно к задаче классификации типов нефтяных загрязнений водной поверхности.

Классификация по трем классам с использованием традиционного метода корреляционного анализа позволила классифицировать нефтяные загрязнения с высокой вероятностью правильной классификации (более 0,92). Однако применение данного метода, как указывалось ранее, требует больших временных затрат на проведение измерений и обработку отсчетов для принятия конечного решения.

Уменьшение временных затрат на проведение измерений и обработку отсчетов, как и в случае метода обнаружения загрязнений, возможно путем перехода от регистрации всего спектра флуоресценции к регистрации интенсивности флуоресценции в нескольких спектральных диапазонах, определяемых в соответствии с (1).

Для выбора параметров спектральных диапазонов, как и в случае решения задачи обнаружения, более результативны эвристические алгоритмы выбора квазиоптимального числа спектральных диапазонов для задачи классификации $N_{кл}$. Так как классификации типов нефтяных загрязнений предшествует обнаружение загрязнения, то для упрощения приемной системы флуориметра целесообразно использовать спектральные диапазоны, используемые для решения задачи обнаружения. Однако анализ отсчетов интенсивности только в выбранных для задачи обнаружения спектральных диапазонах не позволил уверенно классифицировать типы нефтяных загрязнений.

Для повышения вероятности правильной классификации разработан алгоритм выбора дополнительных спектральных диапазонов. Суть разработанного алгоритма заключается в проверке условия $P_{пр.кл.}(N_{кл},\lambda_1,...,\lambda_{N_{кл}})\big|_{K_j} \geq P_0$, где K_j определяет пару классов из множества N, причем $j = 1,...,N(N-1)/2$. Пространство признаков находится в соответствии с выражением (2), а величина P_0 определяет требуемое значение вероятности правильной классификации.

Если нужно обеспечить величину P_0 не менее 0,9, необходимо анализировать отсчеты не в трех, а в пяти спектральных диапазонах ($\lambda_1 = 314$ нм, $\lambda_2 = 335$ нм, $\lambda_3 = 400$ нм, $\lambda_4 = 339$ нм и $\lambda_5 = 358$ нм при $\Delta\lambda = 8$ нм). Тогда конечное решение принимается в трехмерном пространстве признаков:

$$\alpha_{35} = \frac{I_3}{I_5}, \tag{7}$$

$$\alpha_{42} = \frac{I_4}{I_2}, \tag{8}$$

$$\alpha_{52} = \frac{I_5}{I_2}. \tag{9}$$

Значения признаков α_{35}, α_{42} и α_{52}, определенные по измеренным спектрам флуоресценции образцов, представлены на рис. 6.

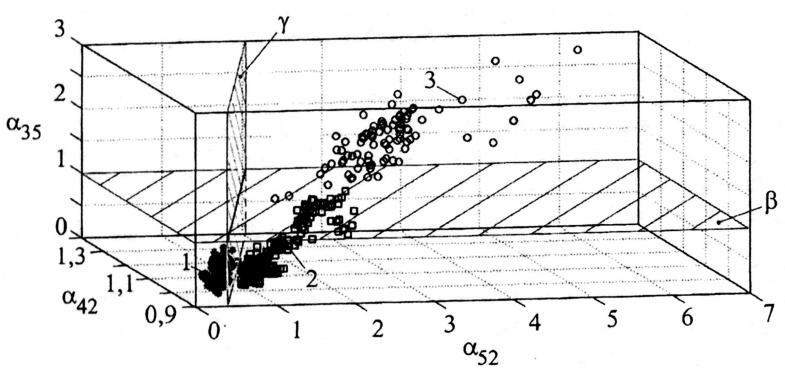


Рис. 6.

Значения признаков α_{35}, α_{42} и α_{52}, определенные по измеренным спектрам флуоресценции образцов: 1 – загрязнения легкими нефтепродуктами; 2 – загрязнения тяжелыми нефтепродуктами; 3 – загрязнение сырой нефтью; β, γ – плоскости разделения классов

Плоскости разделения классов β, γ задаются следующими уравнениями:

$$\beta(\alpha_{42},\alpha_{52},\alpha_{35}): \quad b_1 \cdot \alpha_{42} + b_2 \cdot \alpha_{52} + b_3 \cdot \alpha_{35} + b_0 = 0, \tag{10}$$

$$\gamma(\alpha_{42},\alpha_{52},\alpha_{35}): \quad g_1 \cdot \alpha_{42} + g_2 \cdot \alpha_{52} + g_3 \cdot \alpha_{35} + g_0 = 0. \tag{11}$$

Решение о классификации типа нефтяного загрязнения на земной поверхности принимается в соответствии с выражениями:

$$\mathbf{C}_{\text{ЛН}} \rightarrow \mathbf{C} \cap \left(\beta(\alpha_{42},\alpha_{52},\alpha_{35}) < 0\right) \cap \left(\gamma(\alpha_{42},\alpha_{52},\alpha_{35}) \geq 0\right), \tag{12}$$

$$\mathbf{C}_{\text{ТН}} \rightarrow \mathbf{C} \cap \left(\beta(\alpha_{42},\alpha_{52},\alpha_{35}) < 0\right) \cap \left(\gamma(\alpha_{42},\alpha_{52},\alpha_{35}) < 0\right), \tag{13}$$

$$\mathbf{C}_{\text{Н}} \rightarrow \mathbf{C} \cap \beta(\alpha_{42},\alpha_{52},\alpha_{35}) \geq 0. \tag{14}$$

Значения коэффициентов уравнений плоскостей (10), (11) определялись путем численного моделирования на основании измеренных спектров флуоресценции образцов. Полученные вероятности классификации приведены в таблице 1. Как видно, минимальная вероятность правильной классификации составила 0,94 при максимальной вероятности ложной классификации равной 10^{-2}.

Таблица 1.

Вероятности классификации нефтяных загрязнений земной поверхности

Решение метода классификации / Исследуемые вещества	Легкие нефтепродукты	Тяжелые нефтепродукты	Сырая нефть	Нефтяное загрязнение отсутствует
Легкие нефтепродукты	**0,96**	0,00	0,00	0,04
Тяжелые нефтепродукты	0,00	**0,96**	0,01	0,03
Сырая нефть	0,00	0,00	**0,94**	0,06
Земные поверхности	0,00	0,01	0,00	**0,99**

Верификация метода классификации нефтяных загрязнений земной поверхности, выполненная по спектрам флуоресценции из различных литературных источников, подтвердила его работоспособность. Вероятность правильной классификации легких нефтепродуктов составила ~ 0,8, тяжелых нефтепродуктов – 0,8, сырой нефти – 1,0.

Таким образом, использование для построения пространства признаков интенсивности флуоресценции в пяти спектральных диапазонах и интенсивности рассеянного излучения позволяет обеспечить вероятность правильной классификации нефтяных загрязнений земной поверхности не менее 0,94.

Функциональная схема флуориметра, реализующая разработанные методы контроля нефтяных загрязнений земной поверхности, представлена на рис. 7. Первые четыре канала используются для обнаружения нефтяных

загрязнений, а все шесть каналов - для классификации типов нефтяных загрязнений.

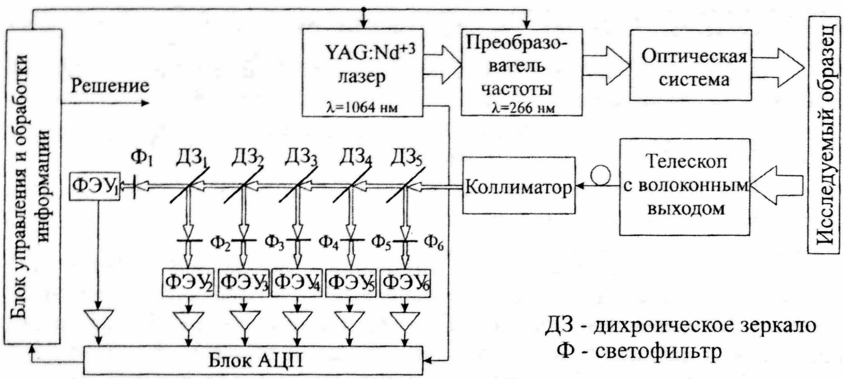


Рис. 7.
Функциональная схема флуориметра для контроля нефтяных загрязнений земной поверхности

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Создан банк данных спектров флуоресценции незагрязненных и загрязненных различными нефтепродуктами земных поверхностей, содержащий 870 спектров.
2. Экспериментально установлено, что незагрязненная и загрязненная различными нефтепродуктами земная поверхность имеет отличия в интенсивности и спектре флуоресценции.
3. Экспериментально показано, что спектр флуоресценции нефтяных загрязнений слабо зависит от типа грунта, однако существенно зависит от типа нефтепродукта.
4. Показано, что регистрация интенсивности флуоресценции в трех специально выбранных спектральных диапазонах и интенсивности лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью, обеспечивает обнаружение нефтяных загрязнений земной поверхности с вероятностью правильного обнаружения порядка 0,96 при вероятности ложного обнаружения не более 10^{-2}.
5. Показано, что регистрация флуоресцентного излучения в пяти специально выбранных спектральных диапазонах и интенсивности лазерного излучения, рассеянного земной поверхностью, позволяет определить тип нефтяного загрязнения земной поверхности (легкие, тяжелые нефтепродукты и сырая нефть) с вероятностью правильной классификации не менее 0,94.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в пяти узких спектральных диапазонах / О.А. Матросова [и др.] // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2013. № 3. URL. http://technomag.edu.ru/doc/539554.html

2. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах / О.А. Матросова [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 208-212.

3. Федотов Ю.В., Матросова О.А. Экспериментальная установка для измерения спектров флуоресценции нефтяных загрязнений и различных подстилающих поверхностей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск (№9). 2012. С. 107 – 114.

4. Исследование спектров флуоресценции нефтяных загрязнений и природных образований при возбуждении на длине волны 266 нм / О.А. Матросова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 9-2. С. 105-109.

5. Иерархический метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в четырех узких спектральных диапазонах / О.А. Матросова [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 2. URL. http://technomag.edu.ru/doc/326277.html

6. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции природных образований и нефтяных загрязнений / О.А. Матросова [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. URL: http://technomag.edu.ru/doc/256187.html

7. Лазерный дистанционный метод классификации нефтяных загрязнений / О.А. Матросова [и др.] // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. 2011. № 3. С. 17 – 25.

8. Oil spills detection on different underlying surfaces / O.A. Matrosova [at al.] // 18th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proccedings SPIE 8696. 2012. URL. http://dx.doi.org/10.1117/12.2008233

9. Обнаружение нефтяных загрязнений на различных подстилающих поверхностях / О.А. Матросова [и др.] // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник трудов XVIII международного симпозиума. Томск, 2012. С. 78-82.

10. Флуоресцентный метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности / О.А. Матросова [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 14-ая международная научно-техническая конференция. М., 2012. С. 35-37.

11. Федотов Ю.В., Матросова О.А. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции подстилающих поверхностей и нефтяных загрязнений // Медико-технические технологии на страже здоровья: 14-ая международная научно-техническая конференция. М., 2012. С. 45-47.

12. Федотов Ю.В., Матросова О.А. Иерархический метод классификации нефтяных загрязнений по спектрам лазерной флуоресценции // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник трудов XVII международного симпозиума. Томск, 2011. С. 144 – 147.

13. Технический облик лазерного флуорометра для обнаружения загрязнений нефтью и нефтепродуктами земной поверхности / О.А. Матросова [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 13-ая международная научно-техническая конференция. М., 2011. С. 71-72.

14. Комплекс программ моделирования работы лазерного флуоресцентного метода обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности / О.А. Матросова [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 13-ая международная научно-техническая конференция. М., 2011. С. 72-74.

15. Разработка банка данных спектров флуоресценции земных поверхностей, нефтей и нефтепродуктов / О.А. Матросова [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 12-ая международная научно-техническая конференция. М., 2010. С. 88-89.

16. Козинцев В.И., Матросова О.А., Федотов Ю.В. Методика калибровки лазерного флюориметра, позволяющая получать абсолютные значения интенсивности спектров // Медико-технические технологии на страже здоровья: 12-ая международная научно-техническая конференция. М., 2010. С. 90-91.