

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ДИАПАЗОНОВ РЕГИСТРАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗЛИВОВ ЛЕГКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

М.Л. Белов

belov@bmstu.ru

Ю.В. Федотов

fed@bmstu.ru

Нгуен Минь Бач

nguyenminhbach61097vt@gmail.com

В.А. Городничев

gorod@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На основе экспериментально измеренных спектров флуоресценции легких нефтепродуктов, водных объектов и растительности проведено математическое моделирование в целях анализа эффективных спектральных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для обнаружения разлива легких нефтепродуктов для волны возбуждения флуоресценции длиной 355 нм. Выявлено, что вероятности правильного обнаружения и ложных тревог для задачи обнаружения разливов легких нефтепродуктов зависят от типа нефтепродукта. Наибольшие вероятности правильного обнаружения (более 0,999) и небольшие вероятности ложных тревог (менее 0,012) можно обеспечить для легких нефтепродуктов с максимумами интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 390, 415 нм (при использовании двух спектральных каналов ~ 390, 550 нм и ~ 415, 475 нм). Для легких нефтепродуктов с максимумами интенсивности флуоресцентного излучения на длине волны ~ 430 нм наиболее эффективным является использование трех спектральных каналов с центральными длинами волн ~ 430, 475, 675 нм. Для таких нефтепродуктов результаты получаются несколько хуже, но все равно флуоресцентный мониторинг обеспечивает большие вероятности правильного обнаружения и небольшие вероятности ложных тревог. Для легких нефтепродуктов с макси-

Ключевые слова

*Лазерный мониторинг,
флуоресцентный метод,
обнаружение нефтяных
загрязнений*

мумом интенсивности флуоресцентного излучения на длине волны ~ 470 нм наиболее эффективным является использование двух спектральных каналов с центральными длинами волн ~ 535, 695 нм. Для спектров нефтепродуктов, характерных для большого промежутка времени после разлива, результаты получаются хуже: большие вероятности правильного обнаружения и ложных тревог

Поступила 16.06.2023

Принята 02.10.2023

© Автор(ы), 2024

Введение. Нефть и нефтепродукты являются наиболее распространенными загрязняющими веществами на земной поверхности [1–5]. Наибольшие потери нефти и нефтепродуктов связаны с их транспортировкой. Для транспортировки можно использовать практически любые виды транспорта, но наиболее распространенным является трубопроводный транспорт.

К преимуществам использования трубопроводного транспорта относят низкую стоимость транспортировки, большую безопасность (по сравнению с транспортировкой железнодорожными или автоцистернами), практически полную автоматизацию процесса перекачки, простоту использования и надежность. Трубопроводы делятся на нефтепроводы (для сырой нефти) и нефтепродуктопроводы. Наряду с большой сетью нефтепроводов Россия имеет и большую сеть нефтепродуктопроводов.

Системы контроля утечек из трубопроводов, существующие в настоящее время [6], имеют чувствительность от единиц до сотых долей процента объема прокачки трубопровода и не регистрируют утечки малой интенсивности. Поэтому задача контроля утечек малой интенсивности из трубопроводов, в том числе из нефтепродуктопроводов, является актуальной.

Наиболее перспективным методом обнаружения утечек из трубопроводов (в том числе и утечек малой интенсивности) является лазерно-индуцированный флуоресцентный метод, позволяющий обнаружить утечки малой интенсивности из нефтепроводов независимо от времени суток и с большой надежностью [7].

Число работ, посвященных исследованию лазерного флуоресцентного мониторинга загрязнений, вызванных утечками из нефтепроводов и затем разливами нефти и нефтепродуктов на земной поверхности, довольно велико [7–20]. Однако некоторые вопросы остаются неисследованными. Например, задача выбора диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для надежного обнаружения утечек из трубопроводов обсуждалась в работах [21, 22], но только для нефти и дизельного топлива.

Цель настоящей работы — анализ спектров лазерно-индуцированной флуоресценции легких нефтепродуктов (бензинов и керосинов) и выбор эффективных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для обнаружения разливов легких нефтепродуктов на длине волны возбуждения флуоресценции 355 нм.

Постановка задачи. Задача лазерного флуоресцентного мониторинга нефтяных загрязнений является сложной, поскольку спектры лазерно-индуцированной флуоресценции различных нефтепродуктов имеют разный вид (в частности, максимумы спектров флуоресценции различных нефтепродуктов находятся в разных спектральных диапазонах). Кроме того, задача лазерного флуоресцентного мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности усложняется из-за мешающих факторов — влияния флуоресценции естественных природных образований, прежде всего растительности и водных объектов [7].

В настоящей работе приведены результаты измерений спектров лазерно-индуцированной флуоресценции легких нефтепродуктов (бензинов и керосинов), растительности и водных объектов. На основе экспериментально измеренных спектров флуоресценции нефти, растительности и воды проведено математическое моделирование в целях выбора наиболее эффективных спектральных диапазонов регистрации для лазерно-индуцированного флуоресцентного мониторинга разливов легких нефтепродуктов на длине волны возбуждения 355 нм.

Лабораторные измерения спектров лазерно-индуцированной флуоресценции легких нефтепродуктов. Структурная схема лабораторной установки для измерения спектров флуоресценции легких нефтепродуктов на длине волны возбуждения 355 нм приведена на рис. 1.

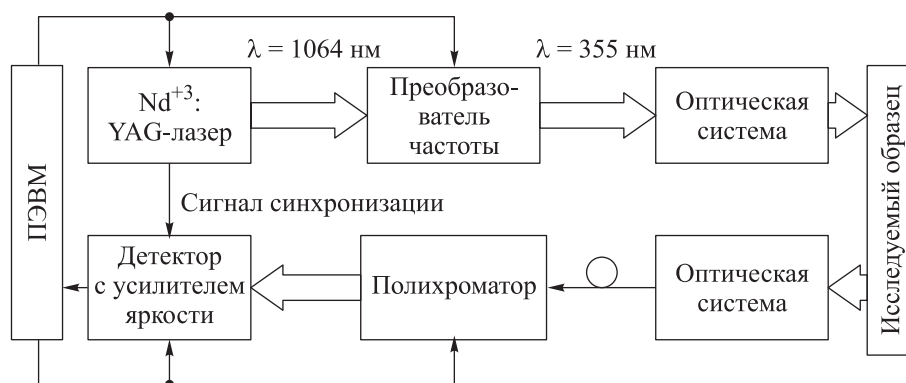


Рис. 1. Структурная схема лабораторной установки для измерения спектров флуоресценции легких нефтепродуктов на длине волны возбуждения 355 нм

В качестве источника возбуждения флуоресценции использован импульсный Nd³⁺:YAG-лазер Ekspla NL204 с диодной накачкой и модуляцией добротности. Приемный канал состоял из оптической системы, полихроматора и высокочувствительного матричного детектора с усилителем яркости на основе электронно-оптического преобразователя частоты.

Калибровка лабораторной установки в целом включала в себя калибровки полихроматора по длине волны и системы регистрации по чувствительности в диапазоне ~ 290...750 нм. При измерениях контролировали мощность выходного излучения лазера. При обработке результатов серий измерений значение интенсивности принимаемого флуоресцентного сигнала приводилось к одному значению мощности излучения лазера.

Основные параметры передающего и приемного каналов лабораторной установки

Длина волны возбуждения флуоресценции, нм	355
Энергия лазерного импульса, мДж	0,8
Длительность лазерного импульса, нс	< 8
Частота повторения, Гц	до 500
Диапазон регистрации спектра, нм	290–750
Разрешение по спектру, нм	5
Диаметр приемного объектива, мм	15
Расстояние до исследуемого образца, м	~ 1,4

При измерении спектров флуоресценции нефтепродуктов, разлитых на почве, слой почвы толщиной 1,0...1,5 см помещали в чашку Петри, затем на ее поверхность наливали исследуемый нефтепродукт объемом 10...30 мл. Площадь загрязнения составляла 15...20 см². Диаметры лазерного пучка возбуждения и поля зрения приемника в плоскости исследуемого образца составляли ~ 20 мм.

Примеры измеренных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции легких нефтепродуктов, растительности и водных объектов приведены на рис. 2–4.

Пик на длине волны 532 нм на спектрах (см. рис. 2–4) соответствует второй гармонике излучения Nd³⁺:YAG-лазера, которую не удалось полностью подавить в приемном канале. Пик на длине волны 403 нм (см. рис. 4, б) соответствует комбинационному (рамановскому) рассеянию воды (для длины волны возбуждения 355 нм).

Определение спектральных диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения для задачи мониторинга разлива легких нефтепродуктов. В результате анализа данных проведенных

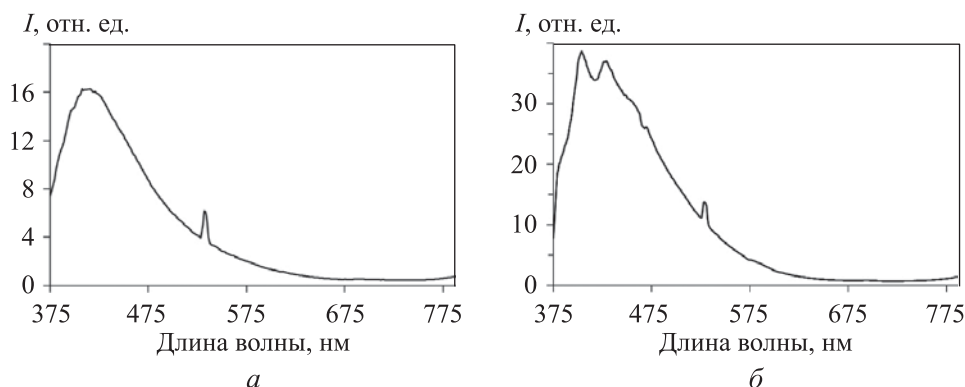


Рис. 2. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции керосина (а) и бензина АИ-92 (б)

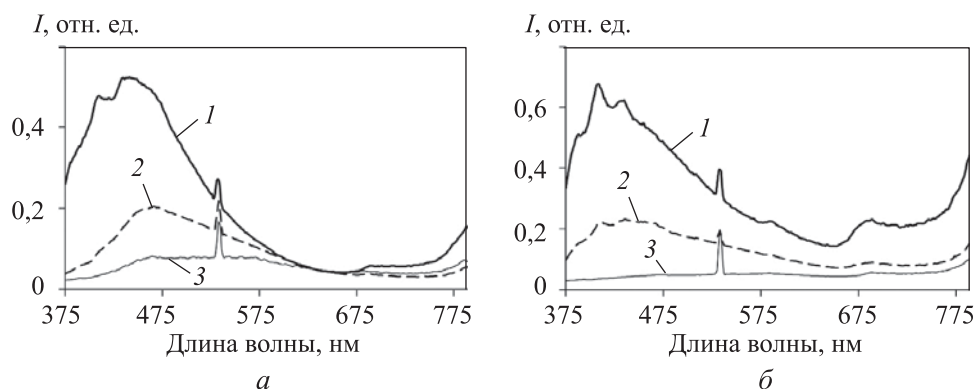


Рис. 3. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции загрязнений нефтепродуктами при разливе бензинов АИ-92 (а) на песке и АИ-95 (б) на почве: 1 — сразу после разлива нефтепродуктов; 2, 3 — через 5 и 12 дней после разлива

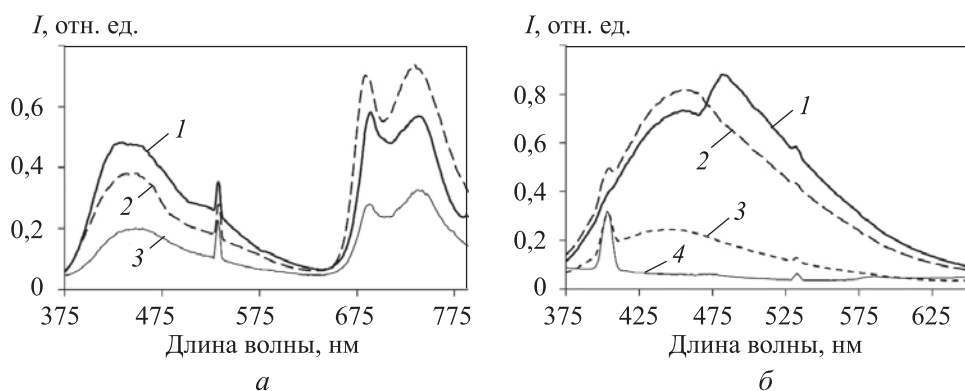


Рис. 4. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции: а — мха (1), зеленых листьев (2), зеленой травы (3); б — воды зацветшего пруда (1), из канала имени Москвы (2), из Лебедянского пруда (относительно чистого) в Москве (3), контрольный образец дистиллированной воды (4)

измерений и из работы [15] выявлены максимумы спектров флуоресценции легких нефтепродуктов в спектральном диапазоне $\sim 390\text{...}470$ нм.

Наиболее значительными факторами, влияющими на обнаружение разлива легких нефтепродуктов лазерно-индуцированным флуоресцентным методом, является флуоресценция растительности и водных объектов.

Анализ результатов измерений и данных из [16, 23–32] позволил определить максимумы флуоресценции растительности и водных объектов в спектральных диапазонах $\sim 400\text{...}550$ нм (для растительности и водных объектов) и $\sim 670\text{...}750$ нм (для растительности). Таким образом, в спектральном диапазоне, в котором находятся максимумы спектров лазерно-индуцированной флуоресценции легких нефтепродуктов ($\sim 390\text{...}470$ нм), может быть значительное флуоресцентное излучение растительности и водных объектов. Это снижает надежность одноканальных флуоресцентных методов мониторинга разливов легких нефтепродуктов, основанных на значительном превышении флуоресцентного сигнала от разлива нефтепродукта над флуоресцентным сигналом от растительности или водных объектов в одном спектральном канале (могут появляться ложные тревоги, вызванные лазерно-индуцированной флуоресценцией растительности и воды).

Для увеличения надежности флуоресцентных методов мониторинга разливов легких нефтепродуктов на фоне водных объектов или растительности необходимо регистрировать флуоресцентное излучение в двух или трех спектральных каналах, которые должны быть разными для различных типов легких нефтепродуктов (так как максимумы спектров флуоресценции легких нефтепродуктов находятся в разных спектральных диапазонах).

Для определения наиболее эффективных (для задачи обнаружения разливов легких нефтепродуктов) спектральных каналов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения проводилось математическое моделирование.

В результате моделирования выявлено, что для керосинов с максимумом интенсивности лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения на длине волны ~ 390 нм наиболее эффективными являются два спектральных канала с центральными длинами волн $\sim 390, 550$ нм и спектральной шириной ~ 40 нм. Для бензинов с максимумом интенсивности флуоресцентного излучения на длине волны ~ 415 нм наиболее эффективными являются два спектральных канала с центральными длинами волн $\sim 415, 475$ нм и спектральной шириной ~ 45 нм.

Флуоресцентные сигналы I_1 , I_2 в спектральных каналах (~ 390 , 550 нм или ~ 415 , 475 нм) использовались для формирования информационного параметра

$$R_1 = \frac{I_2}{I_1}.$$

Результаты расчета информационного параметра R_1 для легких нефтепродуктов, растительности и воды с максимумом интенсивности лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 390 , 415 нм приведены на рис. 5.

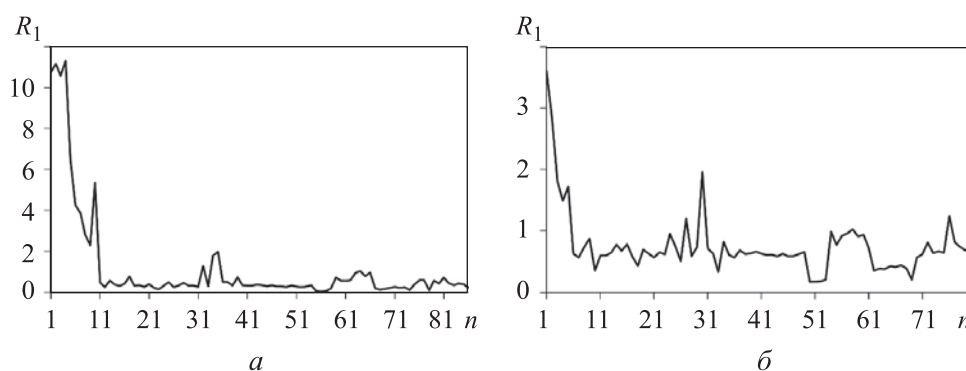


Рис. 5. Расчетные значения информационного параметра R_1 для легких нефтепродуктов, растительности и воды с максимумом флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 390 (а) и 415 нм (б)

На вертикальной оси рис. 5 отложены значения информационного параметра R_1 , на горизонтальной оси — номер n спектра флуоресценции нефти, растительности или воды. Спектрам керосина [13], приведенным на рис. 5, а, соответствуют номера 1–10; зеленой живой и сухой травы — 11, 12; живых зеленых и сухих листьев — 13, 14; горчицы в нормальном состоянии и после заморозков — 15, 16; кукурузы в нормальном состоянии и после нефтяного загрязнения — 17, 18; зеленых, желтых и коричневых листьев боярышника — 19–21; зеленых, желто-коричневых и коричневых листьев ивы — 22–24; живой зеленой, срезанной после 7 и 11 дней и сухой травы — 25–28; различных видов мха — 29–31; росянки — 32; риса — 33; пшеницы — 34; кукурузы — 35; мха — 36; травы — 37; горчицы — 38; табака — 39; риса — 40–54; голубиногороха (*Cajanus Cajan L.*) в нормальном состоянии — 55; голубиногороха (*Cajanus Cajan L.*) при загрязнении почвы кадмием — 56–58; магнолии (*M. Denudata Desr.*) — 59; ивы (*Babylonica Linn*) — 60; падуба (*L. Chinensis Sims.*) — 61; росянки (*C. Dielsiana*) — 62;

орхидеи (*C. Kotoense*) — 63; однолетнего растения *C. Serrulata* — 64; вишни (*C. Yedoensis*) — 65; пшеницы — 66; горчицы — 67–73; травы — 74; пшеницы в нормальном состоянии и при загрязнении почвы кадмием — 75, 76; табака — 77; кукурузы — 78; зеленой части листа Кампелии занонии (*Campelia Zanonia*) — 79. Номера 80–86 соответствуют спектрам флуоресценции воды в судоходном канале, городском пруду, море, акватории порта, морском заливе и реке.

Номера 1–5 (рис. 5, б) соответствуют спектрам флуоресценции бензина различных марок; номера 6–74 и 75–81 — спектрам флуоресценции различных видов растительности и водных объектов, совпадают с номерами 11–79 и 80–86 (см. рис. 5, а).

Из рис. 5 следует, что используемый информационный параметр R_1 для легких нефтепродуктов с максимумом флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 390, 415 нм сильно отличается от параметра R_1 для водных объектов и подавляющего большинства видов растительности. Таким образом, для перечисленных легких нефтепродуктов использование двух спектральных каналов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения (соответственно с центральными длинами волн ~ 390, 550 нм и ~ 415, 475 нм) позволяет надежно обнаруживать разливы легких нефтепродуктов на фоне водных объектов и различных видов растительности. При обработке данных измерений может быть использован пороговый алгоритм для разделения значений параметра R_1 для легких нефтепродуктов от значений параметра R_1 для водных объектов и растительности.

В результате анализа легких нефтепродуктов других типов определено, что для нефтепродуктов (керосинов) с максимумом интенсивности лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 430 нм наиболее эффективным является использование трех спектральных каналов с центральными длинами волн ~ 430, 475 и 675 нм (со спектральной шириной ~ 40 нм).

Отметим спектры легких нефтепродуктов с максимумом интенсивности лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 470 нм — это спектры нефтепродуктов, разлитых на поверхности без растительности (см. рис. 3), измеренные через большой промежуток времени после разлива. Это наиболее трудный случай для обнаружения разливов легких нефтепродуктов, поскольку эти спектры флуоресценции нефтепродуктов похожи на спектры флуоресценции водных объектов. Наиболее эффективным является использование двух спектральных ка-

налов с центральными длинами волн $\sim 535, 695$ нм (со спектральной шириной ~ 30 нм).

Для количественной оценки характеристик обнаружения разливов легких нефтепродуктов на фоне водных объектов и растительности проводилось математическое моделирование. Полагалось, что аддитивный (к флуоресцентным сигналам) шум измерения распределен по нормальному закону с нулевым средним значением и относительным среднеквадратическим отклонением $\delta = 0 \dots 10$ %. Статистическое моделирование проводилось по 10 000 реализациям шума измерения.

При статистическом моделировании проводился расчет:

- вероятности правильного обнаружения разливов легких нефтепродуктов P_d . Вероятность P_d вычисляют как отношение числа реализаций шума, когда пороговый алгоритм правильно обнаруживает разлив нефтепродуктов (определяет значение параметра R_1 как информационный параметр именно нефтепродуктов), к общему числу реализаций шума;

- вероятности ложных тревог P_a . Вероятность P_a вычисляют как отношение числа реализаций шума — пороговый алгоритм неправильно определяет разлив нефтепродуктов (определяет значение информационного параметра R_1 для растительности или воды как информационный параметр нефтепродуктов) — к общему числу реализаций шума.

Вероятности P_d и P_a правильного обнаружения и ложных тревог для задачи обнаружения разливов легких нефтепродуктов на фоне водных объектов и растительности приведены в таблице для спектральных диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения (центральные длины волн, ширина спектрального диапазона), обеспечивающих максимальное значение вероятности правильного обнаружения.

В таблице приведены вероятности для легких нефтепродуктов с максимумом интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн $\sim 390, 415, 430, 470$ нм. Вероятности правильного обнаружения и ложных тревог зависят от типа нефтепродукта и, следовательно, от выбранных для регистрации флуоресцентного излучения спектральных каналов.

Наибольшие вероятности правильного обнаружения ($> 0,999$) и небольшие вероятности ложных тревог ($< 0,012$) можно обеспечить для легких нефтепродуктов (керосинов и бензинов) с максимумами интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн $\sim 390, 415$ нм (при использовании двух спектральных каналов $390, 550$ нм и $415, 475$ нм).

Для керосинов с максимумами интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 430 нм наиболее эффективным является использо-

вание трех спектральных каналов с центральными длинами волн ~ 430, 475, 675 нм. Для таких нефтепродуктов результаты получаются несколько хуже, но все равно флуоресцентный мониторинг обеспечивает большие вероятности правильного обнаружения и небольшие вероятности ложных тревог.

**Вероятности правильного обнаружения P_d и ложных тревог P_a
для легких нефтепродуктов**

Вероятность	Длина волны, нм			
	~ 390	~ 415	~ 430	~ 470
<i>Для шума измерения 1 %</i>				
P_d	> 0,999			
P_a	< 0,001	0,012	0,023	0,340
<i>Для шума измерения 5 %</i>				
P_d	> 0,999		0,981	> 0,999
P_a	< 0,001	0,012	0,025	0,342
<i>Для шума измерения 10 %</i>				
P_d	> 0,999		0,906	> 0,999
P_a	< 0,001	0,013	0,043	0,343

Для легких нефтепродуктов, разлитых на поверхности без растительности, с максимумом интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 470 нм наиболее эффективным является использование двух спектральных каналов с центральными длинами волн ~ 535, 695 нм. Для спектров нефтепродуктов, характерных для большого промежутка времени после разлива, результаты получаются хуже: в зависимости от выбора порогового алгоритма, либо большие вероятности правильного обнаружения и ложных тревог, либо небольшие вероятности правильного обнаружения и ложных тревог.

Заключение. На основе экспериментально измеренных спектров флуоресценции легких нефтепродуктов, растительности и водных объектов проведен анализ эффективных спектральных диапазонов регистрации для лазерно-индуцированного флуоресцентного метода обнаружения разливов легких нефтепродуктов на длине волны возбуждения 355 нм. Показано, что вероятность правильного обнаружения и вероятность ложных тревог для задачи обнаружения разливов легких нефтепродуктов зависят от типа нефтепродукта (соответственно от выбранных для регистрации флуорес-

центного излучения спектральных каналов). Для надежного обнаружения разливов легких нефтепродуктов на фоне водных объектов и растительности необходимо регистрировать флуоресцентное излучение в двух или трех спектральных каналах. Наибольшие вероятности правильного обнаружения ($> 0,999$) и небольшие вероятности ложных тревог ($< 0,012$) можно обеспечить для легких нефтепродуктов с максимумами интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн $\sim 390, 415$ нм (при использовании двух спектральных каналов 390, 550 нм и 415, 475 нм). Для легких нефтепродуктов с максимумами интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 430 нм наиболее эффективным является использование трех спектральных каналов с центральными длинами волн $\sim 430, 475, 675$ нм. Для таких нефтепродуктов результаты получаются несколько хуже, но все равно флуоресцентный мониторинг обеспечивает большие вероятности правильного обнаружения и небольшие вероятности ложных тревог. Для легких нефтепродуктов с максимумом интенсивности флуоресцентного излучения на длинах волн ~ 470 нм наиболее эффективным является использование двух спектральных каналов с центральными длинами волн $\sim 535, 695$ нм. Для таких спектров нефтепродуктов, характерных для большого промежутка времени после разлива, результаты получаются хуже: большие вероятности правильного обнаружения и большие вероятности ложных тревог.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Черногаева Г.М., ред. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 год. М., Росгидромет, 2023.
- [2] Huettel M. Oil pollution of beaches. *Curr. Opin. Chem. Eng.*, 2022, vol. 36, art. 100803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100803>
- [3] Roche B.H.R., King M.D. Quantifying the effects of background concentrations of crude oil pollution on sea ice albedo. *The Cryosphere*, 2022, vol. 16, no. 10, pp. 3949–3970. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-16-3949-2022>
- [4] Komene G.L., Remi C.O. Oil pollution crisis and relationship marketing approach of oil firms in Niger delta. *BJMMS*, 2022, vol. 5, no. 1, pp. 39–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.52589/BJMMS-2HWKHHPGW>
- [5] Ismailova N.M., Nadjafova S.I. Experience in assessing environmental risks of main oil pipelines in Azerbaijan through the prism of soil biogeoresistance to crude oil pollution. *Moscow Univ. Soil Sc. Bull.*, 2022, vol. 77, no. 3, pp. 196–202. DOI: <https://doi.org/10.3103/S014768742203005X>
- [6] Zhang J., Hoffman A., Kane A., et al. Development of pipeline leak detection technologies. *10th Int. Pipeline Conf.*, 2014, paper no. IPC2014-33619. DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33619>

- [7] Федотов Ю.В., Белов М.Л., Кравцов Д.А. и др. Лазерный флуоресцентный метод обнаружения утечек нефтепроводов на длине волны излучения 355 нм. *Оптический журнал*, 2019, т. 86, № 2, с. 23–28.
DOI: <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-02-23-28>
- [8] Fedotov Yu.V., Belov M.L., Kravtsov D.A., et al. Selecting laser fluorosensor detection band to monitor oil pipeline leaks. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1155, art. 012074. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012074>
- [9] Федотов Ю.В., Белов М.Л., Кравцов Д.А. и др. Экспериментальные исследования динамики спектров лазерно-индуцированной флуоресценции нефтяных загрязнений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 1 (82), с. 66–76. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-1-66-76>
- [10] Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А. Лазерный моноимпульсный флуоресцентный метод мониторинга нефтяных загрязнений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2018, № 6 (123), с. 62–74.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-62-74>
- [11] Fan Z., Schröder O., Krahl J. Analysis of diesel fuels/biodiesel blends and identification of biodiesel using Time-Resolved-Laser-induced Fluorescence Spectroscopy (TRLFS). *Appl. Agric. Forestry Res.*, 2015, vol. 65, no. 1, pp. 1–14.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3220/LBF1433315502000>
- [12] Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K., et al. LIDAR for remote sensing of contaminations on water and earth surfaces taking place during oil-gas production. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9810. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2225219>
- [13] Palombi L., Lognoli D., Raimondi V. Fluorescence LIDAR remote sensing of oils: merging spectral and time-decay measurements. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8887.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2030204>
- [14] Utkin A.B., Lavrova A., Vilar R. Evaluation of oil spills by laser induced fluorescence spectra. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 7994. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.880750>
- [15] Saitoh N., Takeuchi S. Fluorescence imaging of petroleum accelerants by time-resolved spectroscopy with a pulsed Nd:YAG laser. *Forensic Sc. Int.*, 2006, vol. 163, no. 1-2, pp. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2005.10.025>
- [16] Karpicz R., Dementjev A., Kuprionis Z., et al. Laser fluorosensor for oil spot detection. *Lith. J. Phys.*, 2005, vol. 45, no. 3, pp. 213–218.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3952/lithjphys.45309>
- [17] Hegazi E., Hamdan A., Mastromarino J. Remote fingerprinting of crude oil using time-resolved fluorescence spectra. *Arab. J. Sc. Eng.*, 2005, vol. 30, no. 1B, pp. 3–12.
- [18] Malecha M., Bessant C., Saini S. Identification of oil contaminants on polymer coated beverage cans using fluorescence spectroscopy. *Appl. Spectrosc.*, 2003, vol. 57, no. 8, pp. 1042–1048. DOI: <https://doi.org/10.1366/000370203322259020>
- [19] Pastor J.V., López J.J., Juliá J.E., et al. Planar laser-induced fluorescence fuel concentration measurements in isothermal diesel sprays. *Opt. Express*, 2002, vol. 10, no. 7, pp. 309–323. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.10.000309>

- [20] Patsayeva S., Yuzhakov V., Varlamov V., et al. Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface. *EARSeL eProceedings*, 2000, no. 1, pp. 106–114.
- [21] Белов М.Л., Нгуен Минь Бач. Выбор диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения для задачи обнаружения разливов дизельного топлива. *Контейнент*, 2022, т. 4, № 2, с. 53–67.
- [22] Fedotov Yu.V., Belov M.L., Kravtsov D.A., et al. Experimental studies of efficient sensing fluorescence radiation bands to detect oil and petroleum product spills. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1399, art. 055037.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055037>
- [23] Yang J., Gong W., Shi S., et al. Excitation wavelength analysis of laser-induced fluorescence LiDAR for identifying plant species. *IEEE Geosc. Remote Sens. Lett.*, 2016, vol. 13, no. 7, pp. 977–981. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2557484>
- [24] Meyer S., Cartelat A., Moya I., et al. UV-induced blue-green and far-red fluorescence along wheat leaves: a potential signature of leaf ageing. *J. Exp. Bot.*, 2003, vol. 54, no. 383, pp. 757–769. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erg063>
- [25] Snels M., Guarini R., Dell Aglio M. First results obtained with a LIDAR fluorescence sensor system. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4070, pp. 100–107.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.378144>
- [26] Yang J., Gong W., Shi S., et al. Analyzing the performance of fluorescence parameters in the monitoring of leaf nitrogen content of paddy rice. *Sc. Rep.*, 2016, vol. 6, art. 28787. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep28787>
- [27] Maurya R., Gopal R. Laser-induced fluorescence ratios of *Cajanus cajan L.* under the stress of cadmium and its correlation with pigment content and pigment ratios. *Appl. Spectrosc.*, 2008, vol. 62, no. 4, pp. 433–438.
DOI: <https://doi.org/10.1366/000370208784046687>
- [28] Lichtenthaler H.K., Lang M., Sowinska M., et al. Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *J. Plant Physiol.*, 1996, vol. 148, no. 5, pp. 599–612. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80081-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80081-2)
- [29] Maurya R., Gopal R. Study of laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings growing under cadmium stress. *Gen. Appl. Plant Physiology*, 2005, vol. 31, no. 3-4, pp. 181–196.
- [30] Mishra K.B., Gopal R. Detection of nickel-induced stress using laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, vol. 29, no. 1, pp. 157–173. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160701280975>
- [31] Luedeker W., Guenther K.P., Dahn H.G. Detection and mapping of oil contaminated soils by remote sensing of laser induced fluorescence. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2504, pp. 426–435. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.224129>
- [32] Ciuciu G.J., Secrieru D., Pavelescu G., et al. Investigation of seawater pollution on the Black Sea Romanian coast. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6522.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.723173>

Белов Михаил Леонидович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Федотов Юрий Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Нгуен Минь Бач — студент магистратуры кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Городничев Виктор Александрович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Элементы приборных устройств» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Про́сьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Белов М.Л., Федотов Ю.В., Нгуен Минь Бач и др. Анализ эффективных диапазонов регистрации флуоресцентного излучения для обнаружения разливов легких нефтепродуктов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 2 (147), с. 4–21. EDN: HFSEFK

ANALYSIS OF THE EFFECTIVE FLUORESCENT RADIATION DETECTION RANGE IN IDENTIFYING THE LIGHT PETROLEUM PRODUCTS SPILL

M.L. Belov

belov@bmstu.ru

Yu.V. Fedotov

fed@bmstu.ru

Nguyen Minh Bach

nguyenminhbach61097vt@gmail.com

V.A. Gorodnichev

gorod@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents a mathematical simulation based on the experimentally measured fluorescence spectra of the light petroleum products, water bodies and vegetation to analyze the effective spectral ranges of the fluorescent radiation registration in detecting the light petroleum products spill in regard to the 355 nm fluorescence excitation wavelength. Simulation results revealed that probabilities of correct detection and false alarms in the task of detecting the light oil product

Keywords

Laser monitoring, fluorescent method, oil pollution detection

spills were depending on the oil product type. Highest probabilities of correct detection (more than 0.999) and insignificant probabilities of false alarms (less than 0.012) could be achieved for the light petroleum products with the maximum fluorescent emission intensity at wavelengths of ~ 390, 415 nm (using the two spectral channels, respectively, 390, 550 nm and 415, 475 nm). For the light petroleum products with the maximum fluorescent radiation intensity at the wavelengths of ~ 430 nm, the most effective was to use the three spectral channels with central wavelengths of ~ 430, 475, 675 nm. With such petroleum products, the results were somewhat worse; however, the fluorescent monitoring still provided high probabilities in correct detection and low probabilities of the false alarms. With light petroleum products having the fluorescent radiation maximum intensity at wavelengths of ~ 470 nm, the most effective approach was in using the two spectral channels with the central wavelengths of ~ 535, 695 nm. In such spectrum of the petroleum products (characterizing a long period of time after the spill), results were becoming worse, i.e., higher probabilities of correct detection and false alarms were appearing

Received 16.06.2023

Accepted 02.10.2023

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Chernogaeva G.M., ed. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v rossiyskoy federatsii za 2022 god* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2022]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2023.
- [2] Huettel M. Oil pollution of beaches. *Curr. Opin. Chem. Eng.*, 2022, vol. 36, art. 100803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100803>
- [3] Roche B.H.R., King M.D. Quantifying the effects of background concentrations of crude oil pollution on sea ice albedo. *The Cryosphere*, 2022, vol. 16, no. 10, pp. 3949–3970. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-16-3949-2022>
- [4] Komene G.L., Remi C.O. Oil pollution crisis and relationship marketing approach of oil firms in Niger delta. *BJMMS*, 2022, vol. 5, no. 1, pp. 39–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.52589/BJMMS-2HWKHPGW>
- [5] Ismailova N.M., Nadjafova S.I. Experience in assessing environmental risks of main oil pipelines in Azerbaijan through the prism of soil biogeoresistance to crude oil pollution. *Moscow Univ. Soil Sc. Bull.*, 2022, vol. 77, no. 3, pp. 196–202. DOI: <https://doi.org/10.3103/S014768742203005X>

- [6] Zhang J., Hoffman A., Kane A., et al. Development of pipeline leak detection technologies. *10th Int. Pipeline Conf.*, 2014, paper no. IPC2014-33619. DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33619>
- [7] Fedotov Yu.V., Belov M.L., Kravtsov D.A., et al. Laser fluorescence method for detecting oil pipeline leaks at a wavelength of 355 nm. *J. Opt. Technol.*, 2019, vol. 86, no. 2, pp. 81–85. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000081>
- [8] Fedotov Yu.V., Belov M.L., Kravtsov D.A., et al. Selecting laser fluorosensor detection band to monitor oil pipeline leaks. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1155, art. 012074. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012074>
- [9] Fedotov Yu.V., Belov M.L., Kravtsov D.A., et al. Experimental investigation of the dynamics in laser-induced fluorescence spectra of oil pollution. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 1 (82), pp. 66–76 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-1-66-76>
- [10] Belov M.L., Belov A.M., Gorodnichev V.A. Laser monopulse fluorescent method of oil pollution monitoring. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2018, no. 6 (123), pp. 62–74 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-62-74>
- [11] Fan Z., Schröder O., Krahl J. Analysis of diesel fuels/biodiesel blends and identification of biodiesel using Time-Resolved-Laser-induced Fluorescence Spectroscopy (TRLFS). *Appl. Agric. Forestry Res.*, 2015, vol. 65, no. 1, pp. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.3220/LBF1433315502000>
- [12] Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K., et al. LIDAR for remote sensing of contaminations on water and earth surfaces taking place during oil-gas production. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9810. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2225219>
- [13] Palombi L., Lognoli D., Raimondi V. Fluorescence LIDAR remote sensing of oils: merging spectral and time-decay measurements. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8887. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2030204>
- [14] Utkin A.B., Lavrova A., Vilar R. Evaluation of oil spills by laser induced fluorescence spectra. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 7994. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.880750>
- [15] Saitoh N., Takeuchi S. Fluorescence imaging of petroleum accelerants by time-resolved spectroscopy with a pulsed Nd:YAG laser. *Forensic Sc. Int.*, 2006, vol. 163, no. 1-2, pp. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2005.10.025>
- [16] Karpicz R., Dementjev A., Kuprionis Z., et al. Laser fluorosensor for oil spot detection. *Lith. J. Phys.*, 2005, vol. 45, no. 3, pp. 213–218. DOI: <http://dx.doi.org/10.3952/lithjphys.45309>
- [17] Hegazi E., Hamdan A., Mastromarino J. Remote fingerprinting of crude oil using time-resolved fluorescence spectra. *Arab. J. Sc. Eng.*, 2005, vol. 30, no. 1B, pp. 3–12.
- [18] Malecha M., Bessant C., Saini S. Identification of oil contaminants on polymer coated beverage cans using fluorescence spectroscopy. *Appl. Spectrosc.*, 2003, vol. 57, no. 8, pp. 1042–1048. DOI: <https://doi.org/10.1366/000370203322259020>

- [19] Pastor J.V., López J.J., Juliá J.E., et al. Planar laser-induced fluorescence fuel concentration measurements in isothermal diesel sprays. *Opt. Express*, 2002, vol. 10, no. 7, pp. 309–323. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.10.000309>
- [20] Patsayeva S., Yuzhakov V., Varlamov V., et al. Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface. *EARSeL eProceedings*, 2000, no. 1, pp. 106–114.
- [21] Belov M.L., Nguen Min Bach. Selection of ranges for registration of laser-induced fluorescent radiation for the task of detecting diesel fuel spills. *Kontenant* [Contenant], 2022, vol. 4, no. 2, pp. 53–67 (in Russ.).
- [22] Fedotov Yu.V., Belov M.L., Kravtsov D.A., et al. Experimental studies of efficient sensing fluorescence radiation bands to detect oil and petroleum product spills. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1399, art. 055037. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055037>
- [23] Yang J., Gong W., Shi S., et al. Excitation wavelength analysis of laser-induced fluorescence LiDAR for identifying plant species. *IEEE Geosc. Remote Sens. Lett.*, 2016, vol. 13, no. 7, pp. 977–981. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2557484>
- [24] Meyer S., Cartelat A., Moya I., et al. UV-induced blue-green and far-red fluorescence along wheat leaves: a potential signature of leaf ageing. *J. Exp. Bot.*, 2003, vol. 54, no. 383, pp. 757–769. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erg063>
- [25] Snels M., Guarini R., Dell Aglio M. First results obtained with a LIDAR fluorescence sensor system. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4070, pp. 100–107. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.378144>
- [26] Yang J., Gong W., Shi S., et al. Analyzing the performance of fluorescence parameters in the monitoring of leaf nitrogen content of paddy rice. *Sc. Rep.*, 2016, vol. 6, art. 28787. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep28787>
- [27] Maurya R., Gopal R. Laser-induced fluorescence ratios of *Cajanus cajan* L. under the stress of cadmium and its correlation with pigment content and pigment ratios. *Appl. Spectrosc.*, 2008, vol. 62, no. 4, pp. 433–438. DOI: <https://doi.org/10.1366/000370208784046687>
- [28] Lichtenthaler H.K., Lang M., Sowinska M., et al. Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *J. Plant Physiol.*, 1996, vol. 148, no. 5, pp. 599–612. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80081-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80081-2)
- [29] Maurya R., Gopal R. Study of laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings growing under cadmium stress. *Gen. Appl. Plant Physiology*, 2005, vol. 31, no. 3-4, pp. 181–196.
- [30] Mishra K.B., Gopal R. Detection of nickel-induced stress using laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, vol. 29, no. 1, pp. 157–173. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160701280975>
- [31] Luedeker W., Guenther K.P., Dahn H.G. Detection and mapping of oil contaminated soils by remote sensing of laser induced fluorescence. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2504, pp. 426–435. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.224129>

[32] Ciuciu G.J., Secrieru D., Pavelescu G., et al. Investigation of seawater pollution on the Black Sea Romanian coast. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6522.

DOI: <https://doi.org/10.1117/12.723173>

Belov M.L. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Fedotov Yu.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Nguyen Minh Bach — Master's Degree Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Gorodnichev V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Elements of Instrumentation Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Belov M.L., Fedotov Yu.V., Nguyen Minh Bach, et al. Analysis of the effective fluorescent radiation detection range in identifying the light petroleum products spill. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 2 (147), pp. 4–21 (in Russ.). EDN: HFSEFK