

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-05-54-61

УДК 535.37

Дистанционный лазерный флуоресцентный метод обнаружения утечек нефти на длине волны возбуждения 266 нм

Юрий Викторович Федотов¹, Михаил Леонидович Белов²✉,
Виктор Александрович Городничев³

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹fed@bmstu.ru <https://orcid.org/0000-0001-8184-7550>

²belov@bmstu.ru <https://orcid.org/0000-0001-5475-9694>

³gorod@bmstu.ru <https://orcid.org/0000-0001-5297-9757>

Аннотация

Предмет исследования. Проведены анализ и обоснование возможности реализации дистанционного лазерного флуоресцентного метода обнаружения на земной поверхности утечек нефти на длине волны возбуждения флуоресценции 266 нм. **Метод.** Выполнены лабораторные исследования спектров лазерно-индуцированной флуоресценции чистой нефти и нефти, разлитой на разных почвах при различном времени после разлива, а также спектры лазерно-индуцированной флуоресценции природных и антропогенных элементов местности. Описана экспериментальная установка для дистанционных измерений сигналов лазерно-индуцированной флуоресценции от нефтяного загрязнения на земной поверхности при использовании источника лазерного излучения с длиной волны 266 нм, энергией в импульсе 0,3 мДж и одного спектрального канала приемника с центральной длиной волны 510 и шириной 84 нм. Проведены дистанционные исследования возможности обнаружения нефтяных загрязнений на фоне естественной растительности (кустарники, трава) и не загрязненной нефтью почвы на расстоянии 75 м с использованием излучения с длиной волны возбуждения флуоресценции 266 нм. **Основные результаты.** Получены спектры лазерно-индуцированной флуоресценции товарной нефти Рязанского нефтеперерабатывающего завода и нефти Альметьевского месторождения, а также спектры флуоресценции растительности, почв и асфальта. Анализ данных измерений спектров лазерно-индуцированной флуоресценции показывает, что максимум спектров нефти лежит в диапазоне 450–550 нм. Наибольшим помеховым сигналом при обнаружении разливов нефти на земной поверхности является лазерно-индуцированный флуоресцентный сигнал от растительности. Экспериментально показана возможность дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на фоне растительности и других элементов земного ландшафта как непосредственно после загрязнения, так и через два дня после него. **Практическая значимость.** Экспериментально показана возможность дистанционного мониторинга на земной поверхности нефтяных загрязнений на длине волны возбуждения флуоресценции 266 нм на дистанциях порядка безопасных высот полета летательных аппаратов.

Ключевые слова: лазерно-индуцированная флуоресценция, утечка нефти, земная поверхность, дистанционное обнаружение

Благодарность: авторы выражают благодарность АО «ПЕРГАМ-ИНЖИНИРИНГ», предоставившему образцы нефти.

Ссылка для цитирования: Федотов Ю.В., Белов М.Л., Городничев В.А. Дистанционный лазерный флуоресцентный метод обнаружения утечек нефти на длине волны возбуждения 266 нм // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 5. С. 54–61. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-05-54-61

Коды OCIS: 300.2530, 260.2510, 280.3640

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной как с экономической, так и с экологической точки зрения является задача контроля утечек нефти при ее транспортировке по трубопроводам из-за механических повреждений или их изношенности [1–5].

На сегодняшний день существуют системы мониторинга утечек на нефтепроводах [6, 7]. Однако все они имеют предел чувствительности от единиц до сотых долей процента от объема прокачиваемой нефти и утечки меньшей интенсивностью не обнаруживают.

Поэтому актуальным является поиск сенсора, который может дистанционно и с высокой вероятностью правильного обнаружения проводить мониторинг утечек нефти низкой интенсивности.

Наиболее перспективными для дистанционного обнаружения разливов нефти на водной и земной поверхностях являются лазерные флуоресцентные методы (см. например [4, 8–14]).

Для контроля утечек нефти из трубопроводов такой мониторинг можно осуществлять периодически при использовании авиационного носителя. Лазерный метод позволяет проводить мониторинг в любое время суток. Лазерный сенсор имеет высокое пространственное разрешение и дает возможность обнаруживать нефтяные разливы небольших размеров [4].

В работе [4] был проведен анализ возможности лазерного флуоресцентного метода обнаружения утечек на нефтепроводах с использованием излучения с длиной волны возбуждения флуоресценции 355 нм.

Однако результаты лабораторных исследований спектров лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) нефти, разлитой на почве, и элементов земного ландшафта показали, что на длине волны возбуждения флуоресценции 355 нм флуоресцентный сигнал от разливов нефти на земной поверхности может быть сравним с флуоресцентным сигналом от растительности. Поэтому последний будет вызывать ложные срабатывания лазерного сенсора контроля утечек нефти.

Альтернативой возбуждения флуоресценции излучением с длиной волны 355 нм, как отмечалось в работе [4], является возбуждение на длине волны 266 нм. На этой длине волны

эффективность возбуждения ЛИФ растительности, которая является основным мешающим фактором, значительно меньше, чем на длине волны 355 нм [15]. Кроме того, эффективность возбуждения флуоресценции на длине волны 266 нм для некоторых типов нефти может быть больше, чем на длине волны 355 нм [16].

Отметим, что особенностью излучения с длиной волны 266 нм является необходимость учета его поглощения озоном в земной атмосфере (озон сильно поглощает в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне излучение с длиной волны короче 320 нм).

Однако влияние поглощения озоном для рассматриваемой задачи обнаружения утечек нефти с авиационного носителя невелико по двум причинам. Поглощение атмосферным озоном УФ излучения происходит в основном в верхних слоях атмосферы, в приземном слое атмосферы содержание озона не велико [17]. А полет авиационного носителя для мониторинга разливов нефти должен осуществляться на относительно небольших высотах 100–150 м.

Данные работы [18] показывают, что в приземном слое атмосферы показатель ослабления излучения вследствие молекулярного рассеяния и поглощения озоном на длине волны 266 нм составляет порядка 1 км^{-1} , поэтому на высоте полета авиационного носителя около 100 м ослабление составит порядка $0,9 \text{ км}^{-1}$, т.е. не будет являться существенным фактором. Отметим, что высота полета авиационного носителя 100–150 м для мониторинга разливов нефти обусловлена небольшим значением сигнала флуоресценции и является результатом наших энергетических расчетов, учитывающих дробовой шум, вызванный фоновым солнечным излучением, тепловым и тепловым токами, и использующих характеристики реально доступных лазерных источников и приемников. Оптимальным (с учетом массо-габаритных характеристик лазерного источника излучения с длиной волны 266 нм) является вариант установки флуоресцентного датчика на легкие самолеты типа *Cessna*.

Ниже проводится анализ возможностей дистанционного лазерного флуоресцентного метода мониторинга утечек нефти на длине волны возбуждения флуоресценции 266 нм.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ 266 НМ

Спектры ЛИФ нефти, нефтепродуктов, растительности и водных объектов на длине волны возбуждения 266 нм исследовались разными авторами [19–27]. Однако они использовали для измерения разную аппаратуру и имели определенный конкретный объект исследования. Поэтому, используя данные существующих работ, не представляется возможным сравнить значения флуоресцентных сигналов, например, от нефти и растительности. Комплексного исследования спектров ЛИФ на длине волны возбуждения 266 нм нефтепродуктов и элементов земного ландшафта в рамках какой-либо одной работы не проводилось (кроме ранних работ авторов [28], в которых задача проведения дистанционных измерений не ставилась).

В отличие от работы [28] в данной работе проведены исследования возможности дистанционного обнаружения разливов нефти как непосредственно после нефтяного загрязнения, так и через несколько дней после него, а при лабораторных исследованиях использована многоступенчатая калибровка, позволяющая осуществлять количественное сравнение спектров флуоресценции, измеренных на экспериментальной установке.

Для анализа спектров ЛИФ и определения требований к этой установке сначала были проведены лабораторные измерения. В лабораторной установке использовался импульсный твердотельный YAG:Nd-лазер, система регистрации которого включает полихроматор и высокочувствительный матричный детектор с усилителем яркости на основе электронно-оптического преобразователя. Она позволяет регистрировать спектры ЛИФ в диапазоне 290–750 нм с разрешением 5 нм. Диаметр объектива приемного устройства составляет 15 мм, расстояние от лазера до исследуемого образца — 1,4 м.

Калибровка лабораторной установки включала калибровку полихроматора по длине волны и калибровку приемной системы по чувствительности. Проводился контроль мощности выходного излучения лазера и вводилась поправка, приводящая уровень мощности

сигнала ЛИФ к одному уровню мощности выходного излучения лазерного источника. Кроме этого, лабораторная установка также контролировалась по спектру рамановского рассеяния дистиллированной воды на длине волны возбуждения 266 нм.

По результатам лабораторных исследований были получены спектры ЛИФ товарной нефти Рязанского и Московского нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ), сырой нефти Альметьевского месторождения и при их разливе на разные типы почв и при разных интервалах времени после разлива, а также спектры ЛИФ газового конденсата, разных типов почвы, растительности, асфальта и др.

Типичные спектры ЛИФ, полученные на лабораторной установке приведены на рис. 1, 2.

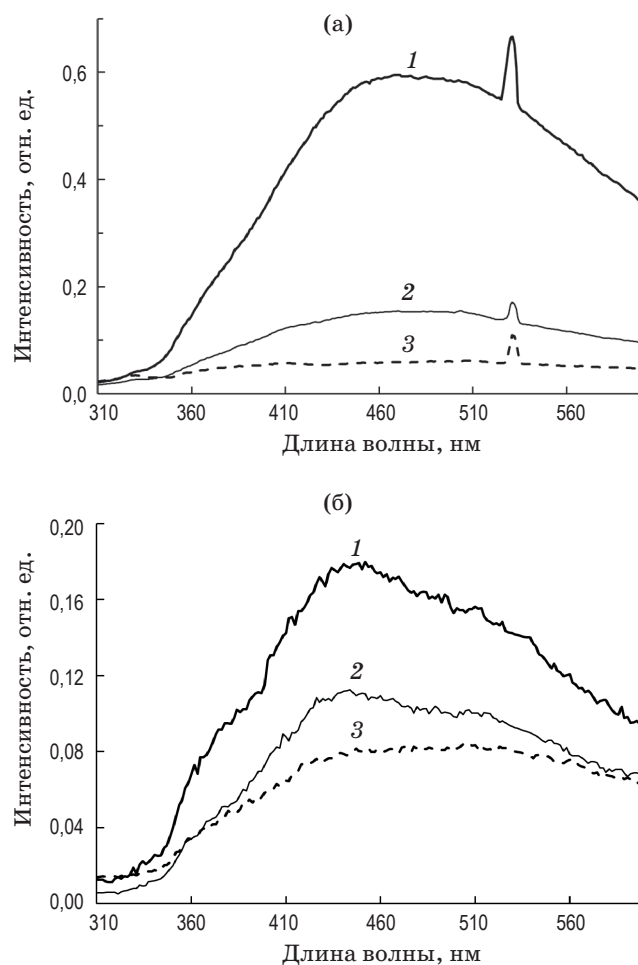


Рис. 1. Спектры ЛИФ нефти Рязанского НПЗ (а) и Альметьевской нефти (б) на черноземе непосредственно после разлива (1), через 5 (2) и через 10 (3) дней после разлива.

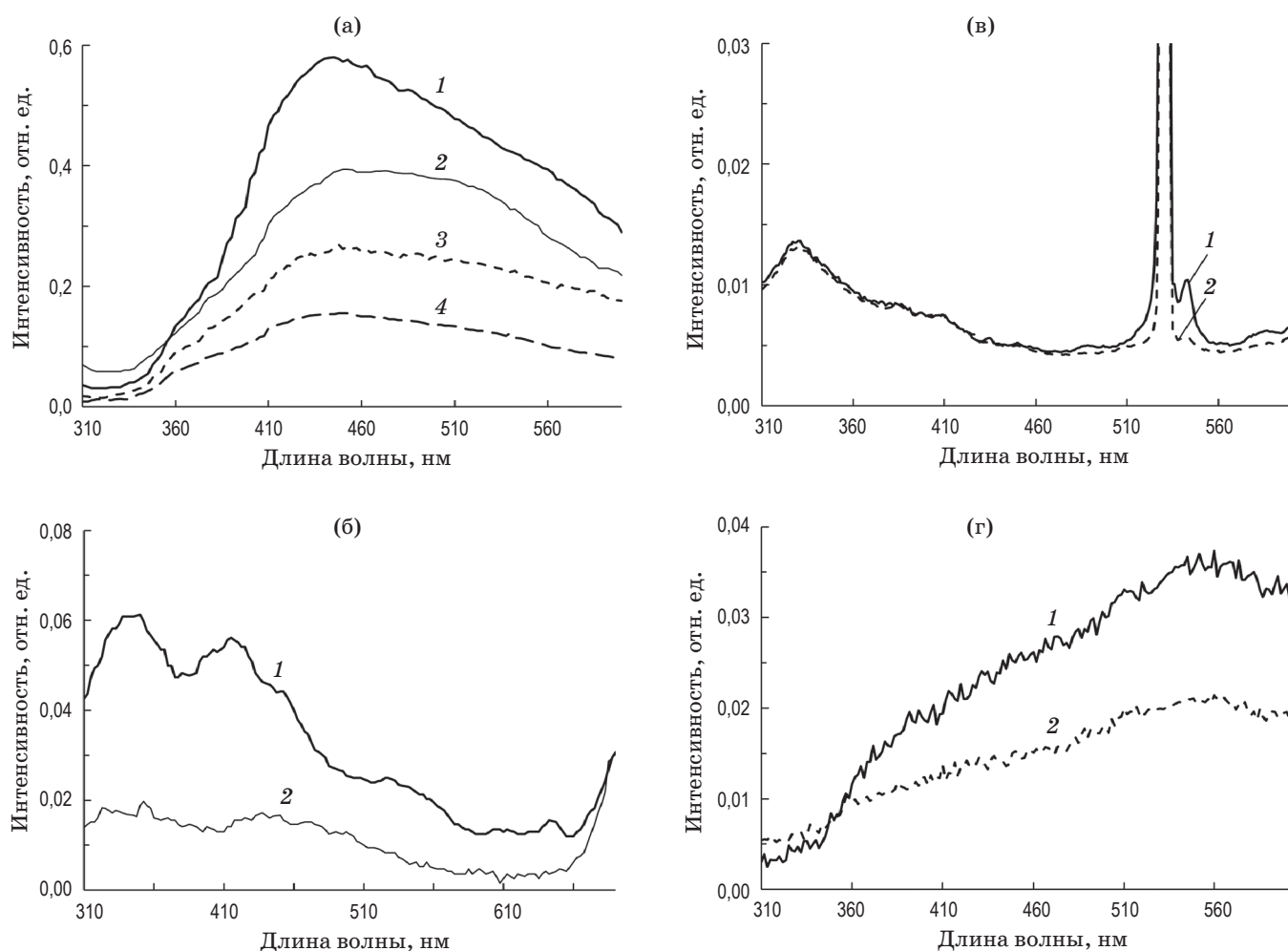


Рис. 2. Спектры ЛИФ Альметьевской нефти на разных почвах (а). 1 — чистая нефть и нефть непосредственно после разлива на черноземе — 2, на глинистой почве — 3, на песке — 4. Спектры ЛИФ листьев деревьев (1) и травы (2) — (б). Спектры ЛИФ почв речного песка (1) и чернозема (2) — (в). Спектры ЛИФ различных участков асфальта (1, 2) — (г)

Пик на некоторых спектрах ЛИФ на длине волны 532 нм соответствует второй гармонике излучения YAG:Nd-лазера.

Анализ данных лабораторных измерений спектров ЛИФ, приведенных на рис. 1, 2, показывает, что максимумы спектров ЛИФ нефти лежат в диапазоне 450–550 нм. В случае разлива нефти на почве флуоресцентный сигнал уменьшается при увеличении времени между разливом нефти и измерением. Наибольшим помеховым сигналом для обнаружения разливов нефти является флуоресцентный сигнал от растительности. При этом флуоресцентный сигнал от почв, асфальта и даже от растительности существенно меньше флуоресцентного сигнала от разлившейся нефти.

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА РАЗЛИВОВ НЕФТИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ 266 НМ

В рамках работы проведены экспериментальные исследования возможности дистанционного мониторинга разливов нефти на земной поверхности на длине волны возбуждения 266 нм с использованием одного спектрального канала регистрации сигналов ЛИФ.

Спектральный канал регистрации сигналов ЛИФ был выбран с центральной длиной волны 510 нм исходя из условия компромисса между максимальным сигналом ЛИФ от нефти и минимальным сигналом ЛИФ от растительности. Что касается спектральной ши-

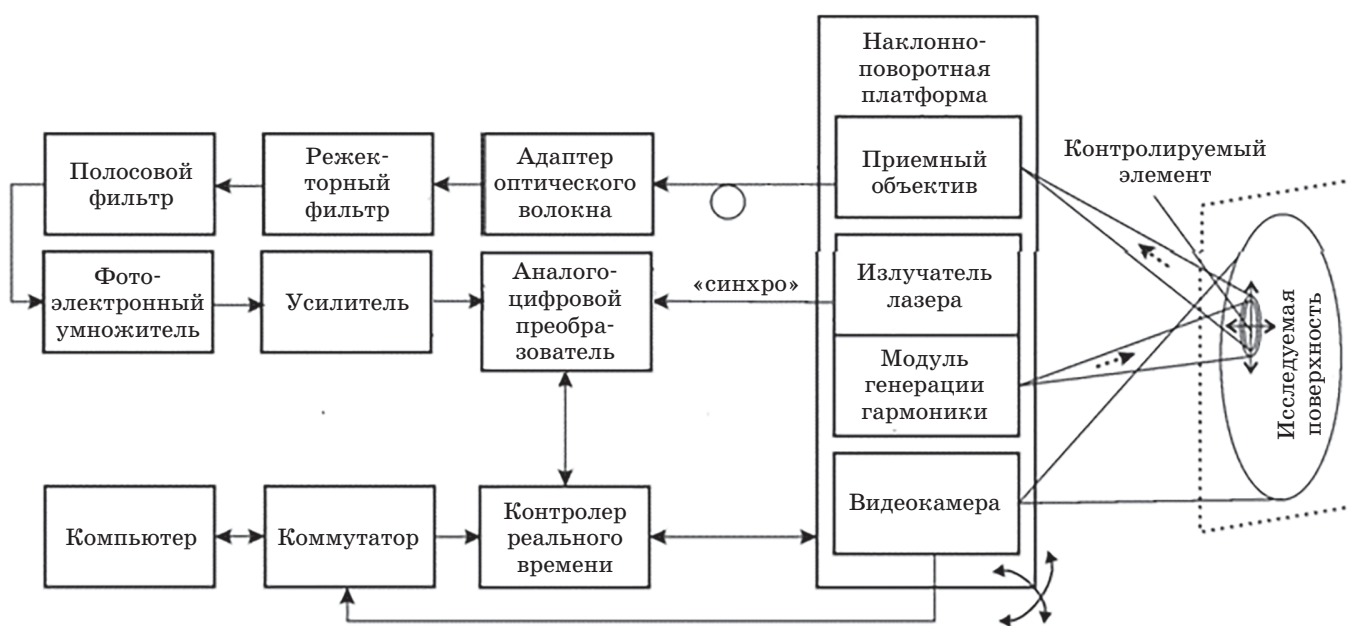


Рис. 3. Структурная схема установки для дистанционных измерений сигналов ЛИФ от нефтяных загрязнений

рины приемного канала, то она должна быть достаточно велика, чтобы обеспечить необходимое значение флуоресцентного сигнала (при дистанционных измерениях в работе использовался спектральный фильтр с шириной 84 нм), но очень большая спектральная ширина приемного канала приводит к большим фоновым помехам.

Структурная схема установки для дистанционных измерений сигналов ЛИФ от нефтяного загрязнения на земной поверхности представлена на рис. 3.

В качестве источника возбуждения ЛИФ выбрана четвертая гармоника YAG:Nd-лазера (*Ekspla NL204*) с энергией в импульсе 0,3 мДж, длительностью импульса 8 нс и частотой повторения 500 Гц. Для подавления лазерного излучения на длине волны 532 нм использован режекторный фильтр *Semrock NF01-510/84-25*. Для регистрации излучения флуоресценции выбран полосовой фильтр *Semrock FF01-510/84-25* с центральной длиной волны 510 нм и шириной полосы пропускания 84 нм. Угловое поле приемной оптической системы – 1,3 мрад. Расходимость лазерного излучения — 1 мрад. Фокусное расстояние приемного объектива (*Solar CT*) – 285 мм, относительное отверстие — 1:4,4. В состав установки входят фотоэлектронные

умножители *Hamamatsu H10721-20* и усилитель *Hamamatsu C1184*. Видеокамера (*IGV-B1610C*) используется для контроля измерений.

Измерения на созданной установке проводились на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в Дмитровском районе Московской области. В качестве исследуемого образца использовалась почва (в ящике размером 33×33 см), загрязненная нефтью. Товарная нефть Московского НПЗ наносилась на поверхность почвы с помощью пульверизатора в количестве около 50 мл на исследуемый образец, который располагался на расстоянии 75 м от установки. Измерения проводились в летнее время на слабонаклонной трассе, близкой к горизонтальной (ящик с почвой, загрязненной нефтью, устанавливался наклонно), на фоне естественной растительности (кустарники, трава) и не загрязненной нефтью почвы.

Луч лазерного излучателя сканировал по углу, и его траектория проходила как по естественной растительности и почве, так и по почве, загрязненной нефтью.

На рис. 4 представлены результаты дистанционного измерения свежего нефтяного загрязнения и загрязнения, состаренного в течение 2 суток (в течение этих двух суток стояла сухая погода без дождей).

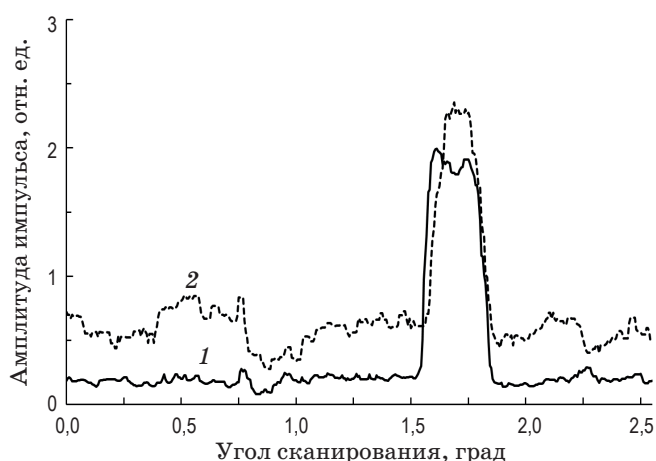


Рис. 4. Результаты дистанционного измерения амплитуды импульса регистрируемого флуоресцентного сигнала в зависимости от азимута угла сканирования непосредственно после нефтяного загрязнения (1), через два дня после него (с другим коэффициентом усиления аппаратуры) — (2)

Из рисунка видно, что амплитуда импульса флуоресценции, зарегистрированного от нефтяного загрязнения, существенно превышает уровень сигнала, зарегистрированного от окружающей растительности, даже в случае измерения через два дня после загрязнения.

Полученные экспериментальные данные показывают перспективность лазерного сенсора

с длиной волны возбуждения флуоресценции 266 нм для задачи мониторинга утечек нефти низкой интенсивности на нефтепроводах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ и обоснование возможности реализации дистанционного лазерного флуоресцентного мониторинга утечек нефти на нефтепроводах с использованием излучения с длиной волны возбуждения флуоресценции 266 нм. Приведены результаты экспериментальных исследований спектров лазерно-индуцированной флуоресценции чистой нефти и нефти, разлитой на различных видах почвы при разном времени после разлива, а также спектры флуоресценции природных и антропогенных элементов местности. Проведены дистанционные исследования возможности обнаружения нефтяных загрязнений на фоне естественной растительности (кустарники, трава) и не загрязненной нефтью почвы на расстоянии 75 м с использованием излучения с длиной волны возбуждения флуоресценции 266 нм. Экспериментально показана возможность дистанционного мониторинга утечек нефти на земной поверхности как непосредственно после загрязнения, так и через два дня после него на дистанциях порядка безопасных высот полета летательных аппаратов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adesina G.O., Adelasoye K.A. Effect of crude oil pollution on heavy metal contents, microbial population in soil, and maize and cowpea growth // *Agricultural Sci.* 2014. V. 5. № 1. P. 43–50.
2. Osuagwu A.N., Okigbo A.U., Ekpo I.A., Chukwurah P.N., Agbor R.B. Effect of crude oil pollution on growth parameters, chlorophyll content and bulbils yield in air potato (*Dioscorea bulbifera* L.) // *Internat. J. Appl. Sci. and Technol.* 2013. V. 3. № 4. P. 37–42.
3. Allison E., Mandler B. *Petroleum and the environment.* American Geosciences Institute. 2018. 102 p.
4. Lotfinasabasl S., Gunale V.R., Rajurkar N.S. Petroleum hydrocarbons pollution in soil and its bioaccumulation in mangrove species, *Avicennia Marina* from Alibaug mangrove // *Internat. J. Advancements in Research & Technol.* 2013. V. 2. № 2. P. 1–7.
5. Adegboye M.A., Fung W.-K., Karnik A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches // *Sensors.* 2019. V. 19. № 2548. P. 1–36.
6. Система обнаружения утечек // URL: <https://zetlab.com/produkcija/sistemy-pod-kluch/sistema-obnaruzheniya-utechek-sou/> (accessed: 4.11.2021).
7. Development of pipeline leak detection technologies // 10th Internat. Pipeline Conf. V. 1. Design and Construction; Environment; Pipeline Automation and Measurement. Calgary, Alberta, Canada, 2014. P. 1–8.
8. Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K., Musayev A., Sadikhov I. Lidar for remote sensing of contaminations on water and earth surface taking place during oil-gas production // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9810. P. 981018-1–981018-7.

9. Polombi L., Lognoli D., Raimondi V. Fluorescence LIDAR remote sensing of oils: Merging spectral and time-decay measurements // *Proc. SPIE*. 2013. V. 8887. P. 88870F-1–88870F-8.
10. Fedotov Yu.V., Kravtsov D.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Experimental study of fluorescence spectra of oil pollutions on the terrain surface excited at 355 nm // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. P. 108333C-1–108333C-6.
11. Naseer M.H., Ayad Z.M., Fareed F.R., Shahad I.Y. Determination of absorption and fluorescence spectrum of Iraqi crude oil // *Amer. J. Phys. Appl.* 2016. V. 4. № 3. P. 78–83.
12. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // *Sensors*. 2018. V. 18. № 91. P. 1–18.
13. Hussein A.E., Marzouk A. Characterization of petroleum crude oils using laser induced fluorescence // *J. Petroleum & Environmental Biotechnol.* 2015. V. 6. № 5. P. 1–6.
14. Федотов Ю.В., Белов М.Л., Кравцов Д.А., Городничев В.А. Лазерный флуоресцентный метод обнаружения утечек нефтепроводов на длине волны излучения 355 нм // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 2. P. 23–28.
15. Chappelle E.W., Corp L.A., McMurtrey J.E., Kim M.S., Daughtry C.S.T. Fluorescence: A diagnostic tool for the detection of stress in plants // *Proc. SPIE*. 1997. V. 2959. P. 1–10.
16. Bugden J.B.C., Yeung C.W., Kepkay P.E., Lee K. Application of ultraviolet fluorometry and excitation–emission matrix spectroscopy (EEMS) to fingerprint oil and chemically dispersed oil in seawater // *Marine Pollution Bulletin*. 2008. № 56. P. 677–685.
17. Ortenberg F. *Ozone: Space vision* — ASRI. Technion, Haifa, Israel, 2002. 100 p.
18. Андреев Г.А., Бисярин В.П., Соколов А.В., Стрелков Г.М. Распространение лазерного излучения в атмосфере Земли // *Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника*. 1977. Т. 2. С. 1–148.
19. Alaruri S.D., Rasas M., Alamedine O., Jubian S., Al-Bahrani F., Quinn M. Remote characterization of crude and refined oils using a laser fluorosensor system // *Opt. Eng.* 1995. V. 34. № 1. P. 214–221.
20. Löhmansröben H.-G., Schober L. Combination of laser-induced fluorescence and diffuse-reflectance spectroscopy for the in city analysis of Diesel-fuel-contaminated soils // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. № 9. P. 1404–1410.
21. Karpicz R., Dementjev A., Kuprionis Z., Pakalnis S., Westphal R., Reuter R., Gulbinas V. Laser fluorosensor for oil spot detection // *Lithuanian J. Phys.* 2005. V. 45. № 3. P. 213–218.
22. Sivaprakasam V., Killinger D.K. Tunable ultraviolet laser-induced fluorescence detection of trace plastics and dissolved organic compounds in water // *Appl. Opt.* 2003. V. 42. № 33. P. 6739–6746.
23. Sharikova A.V., Killinger D.K. Laser- and UV-LED-induced fluorescence detection of dissolved organic compounds in water // *Proc. SPIE*. 2010. V. 7666. P. 76661L-1–76661L-9.
24. Ciuciu G.J., Secrieru D., Pavelescu G., Savastru D., Nicolae D., Talianu C., Nemue A. Investigation of seawater pollution on Black Sea Romanian coast // *Proc. SPIE*. 2006. V. 6522. P. 65221D-1–65221D-6.
25. Lai A., Santangelo E., Soressi G.P., Fantoni R. Analysis of the main secondary metabolites produced in tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) epicarp tissue during fruit ripening using fluorescence techniques // *Postharvest Biology and Technol.* 2007. V. 43. P. 335–342.
26. Chappelle E.W., Corp L.A., McMurtrey III J.E., Kim M.S., Daughtry C.S.T. Fluorescence: A diagnostic tool for the detection of stress in plants // *Proc. SPIE*. 1997. V. 2959. P. 14–23.
27. Corp L.A., McMurtrey III J.E., Chappelle E.W., Daughtry C.S.T., Kim M.S., Mulchi C.L. Applications of fluorescence sensing systems to the remote assessment of nitrogen supply in field corn (*Zea Mays* L.) // *Proc. SPIE*. 1998. V. 3382. P. 80–90.
28. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26. № 3. С. 208–212.

АВТОРЫ

Юрий Викторович Федотов — кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID 8616246700; <https://orcid.org/0000-0001-8184-7550>; fed@bmstu.ru

Михаил Леонидович Белов — доктор технических наук, профессор, Московский государственный техни-

AUTHORS

Yuri V. Fedotov — Ph D. in Engineering Science, assistant professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID 8616246700; <https://orcid.org/0000-0001-8184-7550>; fed@bmstu.ru

Mikhail L. Belov — Doctor of Engineering Science, professor, Bauman Moscow State Technical University,

ческий университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID 7005640935; <https://orcid.org/0000-0001-5475-9694>; belov@bmstu.ru

Виктор Александрович Городничев — доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID 6506532032; <https://orcid.org/0000-0001-5297-9757>; gorod@bmstu.ru

Moscow, 105005, Russia; Scopus ID 7005640935; <https://orcid.org/0000-0001-5475-9694>; belov@bmstu.ru

Victor A. Gorodnichev— Doctor of Engineering Science, professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID 6506532032; <https://orcid.org/0000-0001-5297-9757>; gorod@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 01.12.2021, одобрена после рецензирования 08.02.2022, принята к печати 29.03.2022