

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ

Н.В. Барышников
Нгуен Минь Бач

baryshnikov@bmstu.ru
nguyenminhbach61097vt
@gmail.com

М.Л. Белов

belov@bmstu.ru

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

Аннотация

На основе экспериментально измеренных спектров отражения проведено исследование эффективности перспективного рефлектометрического метода обнаружения разливов нефтепродуктов на земной поверхности в ближнем ИК-диапазоне. Выполнено математическое моделирование работы исследуемого рефлектометрического метода с помощью аппаратуры с различным спектральным разрешением для земной поверхности с разными элементами ландшафта. При математическом моделировании использованы спектры отражения различных видов почв, загрязненных нефтью, дизельным топливом, моторным маслом и бензином, и спектры отражения чистых (незагрязненных нефтепродуктами) видов песка, глины, суглинка, свежей и сухой хвойной и лиственной растительности, мха, лишайников, пастбищ, болот. При обнаружении нефтяных загрязнений на земной поверхности наилучшие результаты получены при использовании для расчета углеводородного индекса трех узких спектральных диапазонов длин волн: 1,73, 2,095 и 2,33 мкм. Показано, что в этом случае для относительного среднеквадратического значения шума измерения, равного 3 %, рефлектометрический метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности может потенциально обеспечить вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений ~ 0,92 при вероятности ложных тревог ~ 0,03

Ключевые слова

Оптический мониторинг, рефлектометрический метод, обнаружение нефтяных загрязнений

Поступила 03.04.2024

Принята 11.06.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. В настоящее время одной из актуальных экологических задач является оперативное обнаружение утечек нефтепродуктов из нефтепроводов, поскольку в результате изношенности или механических повреждений нефтепроводов существенное количество нефти теряется при транспортировке [1–4].

На нефтепроводах существуют системы обнаружения утечек, предел чувствительности которых составляет от единиц до сотых долей процента расхода нефтепровода. Утечки с интенсивностью менее предела чувствительности не регистрируются [5–8].

Наиболее надежным методом обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности (в том числе и утечек низкой интенсивности из нефтепроводов) является лазерный флуоресцентный метод [9–15].

Физической основой лазерного флуоресцентного метода является значительное превышение (в некоторых спектральных интервалах, зависящих от типа нефтепродукта) флуоресцентного сигнала от нефтяных загрязнений на земной поверхности над флуоресцентным сигналом от земной поверхности без нефтяных загрязнений.

Этот метод позволяет не только обнаруживать разливы нефти и нефтепродуктов, но и классифицировать разливы (легких и тяжелых нефтепродуктов, сырой нефти).

Использование лазерного подсвета позволяет проводить мониторинг в широком интервале атмосферных условий, с высоким пространственным разрешением и в любое время суток.

Наиболее интересным для практического использования вариантом дистанционного контроля нефтепроводов является мониторинг утечек нефти с помощью БПЛА при полете над трассой трубопровода. Однако именно при этом варианте применения лазерного флуоресцентного метода возникает большая проблема, связанная с относительно большими (для БПЛА) массогабаритными характеристиками лазерной флуоресцентной аппаратуры.

Цель настоящей работы — анализ возможностей рефлектометрического метода (альтернативного лазерному флуоресцентному методу), сравнительно недавно предложенного для обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, при использовании которого не возникает проблем с постановкой лазерной флуоресцентной аппаратуры на БПЛА (вследствие небольших массогабаритных характеристик аппаратуры).

Постановка задачи. Рефлектометрический метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности основан на появлении особенно-

стей в форме спектров отражения при наличии углеводородов на земной поверхности [16–25].

Наличие углеводородов на почве проявляется в поглощении излучения в некоторых спектральных интервалах. Для примера на рис. 1 приведен спектр отражения нефтяной эмульсии в ближнем ИК-диапазоне [23]. Стрелками показано локальное уменьшение излучения в спектре отражения вследствие поглощения излучения нефтепродуктами на длинах волн ~ 1730 или 2300 нм.

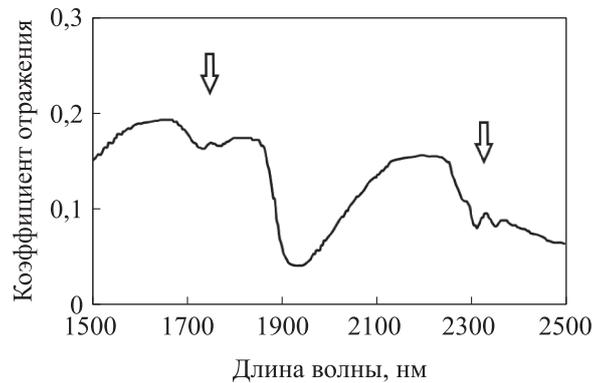


Рис. 1. Спектр отражения нефтяной эмульсии

Для обнаружения нефтепродуктов на земной поверхности используется углеводородный нефтяной индекс НІ (Hydrocarbon oil Index). Для его определения измеряют коэффициенты отражения поверхности (загрязненной или незагрязненной) V_A , V_B , V_C в трех (или двух) узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн λ_A , λ_B , λ_C (или λ_A , λ_B), ~ 1730 или 2300 нм. Углеводородный индекс НІ можно определить так [16–25]:

$$HI = \frac{V_A + V_C}{2V_B}; \tag{1}$$

$$HI = \frac{V_A - V_B}{V_A + V_B}; \tag{2}$$

$$HI = V_A - V_B + (V_C - V_A) \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\lambda_C - \lambda_A}. \tag{3}$$

Для оптимально выбранных длин волн λ_A , λ_B , λ_C (или λ_A , λ_B) значение индекса НІ для загрязненной углеводородами почвы существенно отличается от значения НІ для чистой почвы.

Число проведенных экспериментальных исследований, использующих перспективный метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, пока невелико [16–25]. При этом длины волн λ_A , λ_B , λ_C в работах разных авторов могут существенно различаться. Кроме того, согласно спектрам отражения, приведенным на рис. 1, эффект искажения (вследствие поглощения излучения разлитыми на земной поверхности нефтепродуктами) является небольшим. В связи с этим остается неясным вопрос об эффективности этого метода для разных характеристик регистрирующей аппаратуры (спектральное разрешение, внутренние шумы) и широкого диапазона элементов ландшафта земной поверхности, характеризующихся большим разнообразием спектров отражения.

На основе математического моделирования для ближнего ИК-диапазона проведено исследование эффективности рефлектометрического метода обнаружения разливов нефтепродуктов на земной поверхности с разнообразными элементами ландшафта аппаратурой с разным спектральным разрешением.

Статистическое моделирование потенциальных возможностей рефлектометрического метода мониторинга нефтяных загрязнений на различных земных поверхностях. При статистическом моделировании использованы данные экспериментальных измерений спектров отражения различных земных поверхностей, загрязненных разными нефтепродуктами (нефтью, дизельным топливом, бензином), разлитыми на различных видах почв [16–25], и спектров отражения незагрязненных поверхностей (различных видов песка, глины, суглинка, свежей и сухой хвойной и лиственной растительности, мха, лишайников, пастбищ, болот и др.).

Спектры отражения почвы, загрязненной легкой нефтью Es Sider [16], и песка, загрязненного тяжелой нефтью Iranian Heavy, приведены на рис. 2. Хорошо видны спектральные интервалы поглощения нефтью на длинах волн $\sim 1,73$ и $2,3$ мкм.

Примеры спектров отражения незагрязненных поверхностей приведены на рис. 3^{1,2}. Видно разнообразие спектров отражения земных поверхностей, на фоне которых может проводиться мониторинг разливов нефтепродуктов.

¹ Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., et al. USGS Digital spectral library. U.S. Geological Survey, Data Series 231, 2007. URL: <https://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06> (дата обращения: 22.01.2024).

² Meerdink S.K., Hook S.J., Abbott E.A., et al. ECOSTRESS spectral library. Version 1.0.2018. URL: <https://speclib.jpl.nasa.gov> (дата обращения: 22.01.2024).

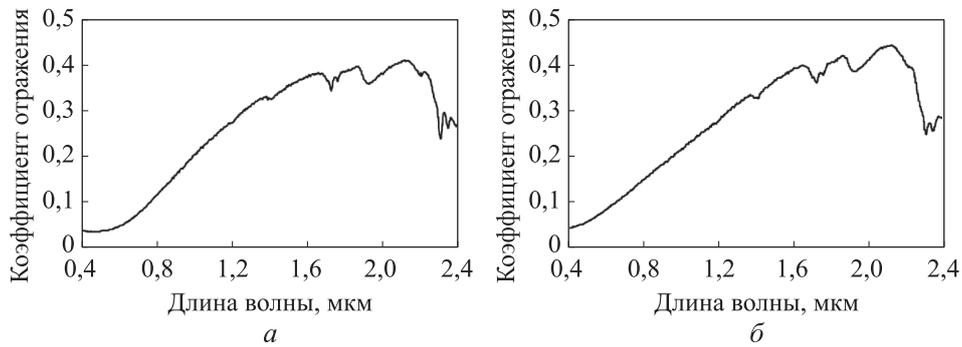


Рис. 2. Спектры отражения почвы (а) и песка (б), загрязненных нефтью

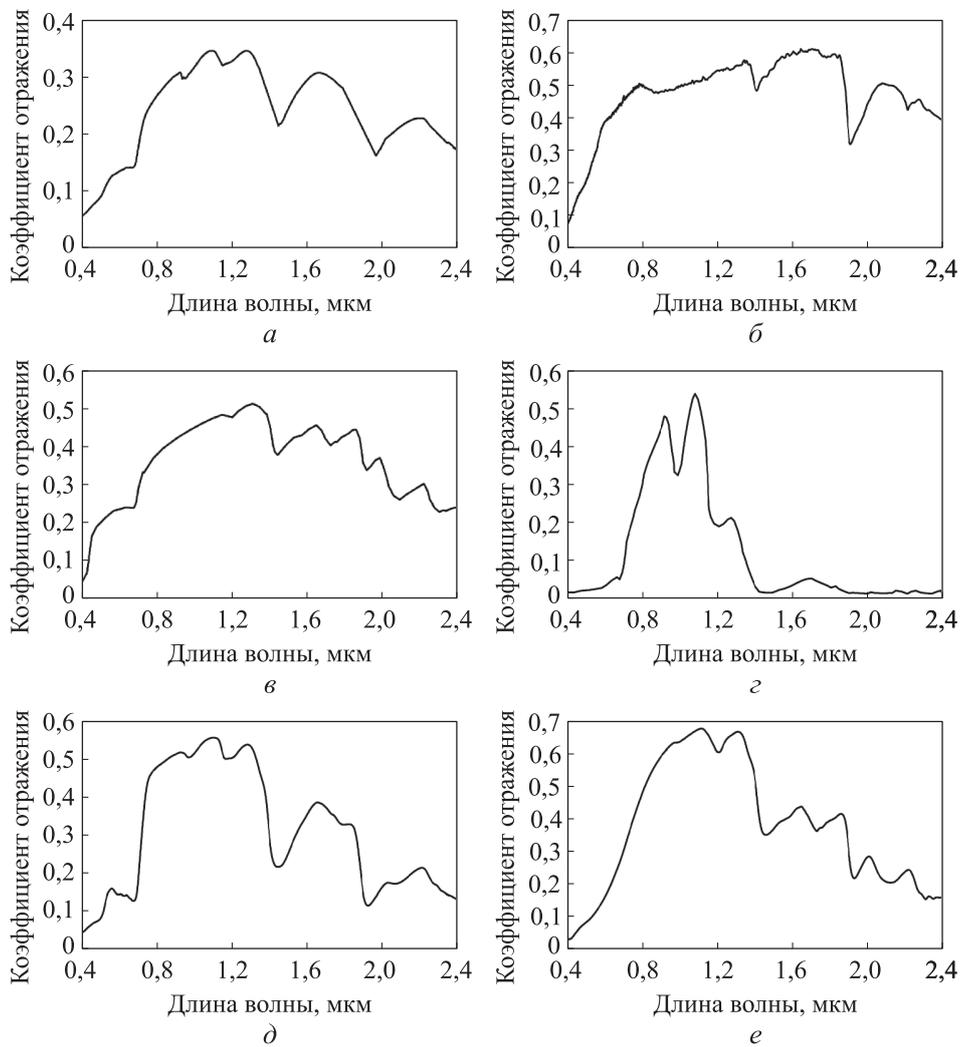


Рис. 3. Примеры спектров отражения влажного песка (а), темной желтовато-коричневой глины (б), лишайника (в), мха (г), болота (д) и сухой хвой сосны (е)

Результаты статистического моделирования работы рефлектометрического метода обнаружения нефтяных загрязнений на различных земных поверхностях. Спектры отражения земных поверхностей, загрязненных нефтепродуктами, и незагрязненных земных поверхностей применены для расчета углеводородного индекса НИ. Здесь использованы углеводородные индексы, рассчитанные по (1) и (2).

Примеры лучших (в результате подбора значений λ_A , λ_B , λ_C для задачи мониторинга нефтяных загрязнений) вариантов расчета углеводородного индекса НИ для загрязненных и незагрязненных нефтепродуктами поверхностей при спектральном разрешении регистрирующей аппаратуры 1 нм приведены на рис. 4.

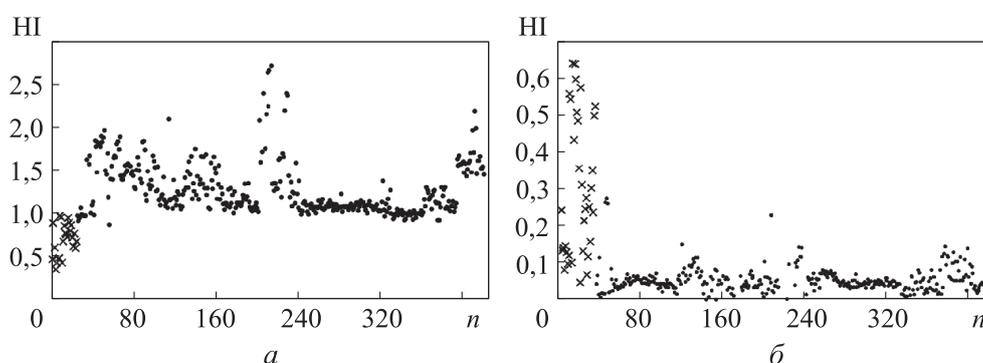


Рис. 4. Зависимости углеводородного индекса НИ для загрязненных и незагрязненных нефтепродуктами поверхностей, рассчитанные по (1) (а) и (2) (б), от номера n спектра отражения в базе данных

Значения углеводородного индекса НИ, рассчитанные по (1), приведены на рис. 4, а. Расчеты выполнены для $\lambda_A = 1,73$ мкм, $\lambda_B = 2,095$ мкм, $\lambda_C = 2,33$ мкм. Значения НИ для $n = 1-25$ (обозначены «x») относятся к поверхностям (песок, почва, бетон), загрязненным нефтью, моторным маслом, дизельным топливом или бензином [16–25]. Значения НИ для $n = 26-420$ (обозначены «•») относятся к незагрязненным поверхностям (песок, почва, глина, бетон, суглинок, мох, лишайники, пастбища, болота, зеленая растительность, сухая растительность). В большинстве случаев реализуется разделение значений индекса НИ для загрязненных и незагрязненных нефтепродуктами поверхностей.

Значения углеводородного индекса НИ, рассчитанные по (2), приведены на рис. 4, б. Расчеты выполнены для $\lambda_A = 2,1$ мкм и $\lambda_B = 2,31$ мкм. Ситуация с разделением значений индекса НИ для загрязненных нефте-

продуктами поверхностей и незагрязненных поверхностей здесь хуже, чем на рис. 4, а.

Для того чтобы количественно оценить работу рефлектометрического метода обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности при разных спектральном разрешении аппаратуры и шуме измерения, проведено статистическое моделирование.

Из спектров отражения загрязненных и незагрязненных нефтепродуктами земных поверхностей формировались данные измерений путем добавления случайного шума измерения. Полагалось, что шум распределен по нормальному закону и имеет нулевое среднее значение. Единственной характеристикой такого шума является его относительное (по отношению к спектральному коэффициенту отражения) среднеквадратическое значение $\delta = 1 \dots 10 \%$. Моделирование проводилось по 10 000 реализаций шумов. Данные измерений коэффициентов отражения (учитывающие случайный шум) использовались для вычисления индекса НИ.

Для обнаружения (по значениям индекса НИ) поверхностей, загрязненных нефтепродуктами, использовался наиболее простой пороговый алгоритм. Если $НИ \leq НИ_{пор}$ (см. рис. 4, а) или $НИ \geq НИ_{пор}$ (см. рис. 4, б), то алгоритм определял поверхность как загрязненную (пороговые значения определялись для каждого массива данных). Если $НИ > НИ_{пор}$ (см. рис. 4, а) или $НИ < НИ_{пор}$ (см. рис. 4, б), то алгоритм определял поверхность как незагрязненную.

В результате статистического моделирования рассчитаны вероятности P_d и P_a правильного обнаружения и ложных тревог. Вероятность P_d найдена как отношение числа реализаций, для которых поверхности с нефтепродуктами определялись алгоритмом именно как загрязненные, к общему числу реализаций (10 000). Вероятность P_a — отношение числа реализаций, для которых чистые поверхности определялись алгоритмом неправильно как загрязненные, к общему числу реализаций (10 000).

Полученные в результате статистического моделирования значения вероятностей P_d и P_a приведены в таблице для данных, соответствующих рис. 4.

Отметим, что вероятности правильного обнаружения и ложных тревог (см. таблицу) практически не зависят от спектрального разрешения аппаратуры. Для значений вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог, приведенных на рис. 4, а, относительное среднеквадратическое значение шума составляет 1 %, для приведенных на рис. 4, б, относительное среднеквадратическое значение шума составляет 3 %.

Вероятности P_d и P_a для $\delta = 1$ (числитель) и 3 % (знаменатель)

Спектральное разрешение прибора, нм	Вероятности правильного обнаружения и ложных тревог			
	рис. 4, а		рис. 4, б	
	P_d	P_a	P_d	P_a
1	0,914 / 0,922	0,023 / 0,030	0,929 / 0,910	0,138 / 0,173
10	0,914 / 0,916	0,023 / 0,030	0,947 / 0,934	0,131 / 0,180
20	0,915 / 0,915	0,023 / 0,030	0,946 / 0,931	0,126 / 0,175
30	0,916 / 0,915	0,023 / 0,030	0,949 / 0,927	0,122 / 0,170

Результаты, приведенные в таблице, указывают на потенциальные возможности метода обнаружения нефтяных загрязнений для широкого диапазона элементов земного ландшафта, на фоне которых работает рефлектометрическая аппаратура в ближнем ИК-диапазоне.

Наилучшие результаты оказываются при использовании для расчета углеводородного индекса HI формулы (1) для длин волн 1,73, 2,095 и 2,33 мкм. В этом случае при относительном среднеквадратическом значении шума измерения 3 % можно потенциально обеспечить вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности $\sim 0,92$ при вероятности ложных тревог $\sim 0,03$.

Заключение. Проведено исследование эффективности рефлектометрического метода обнаружения утечек разливов нефтепродуктов в ближнем ИК-диапазоне. Приведены результаты математического моделирования работы рефлектометрического метода мониторинга с помощью аппаратуры с разным спектральным разрешением разливов различных типов нефтепродуктов на земной поверхности с разными элементами ландшафта. При математическом моделировании использованы спектры отражения загрязненных и незагрязненных нефтепродуктами различных видов почв, песка, глины, суглинка, свежей и сухой растительности, мха, лишайников, пастбищ, болот и др. Наилучшие результаты обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности получены при использовании для расчета углеводородного нефтяного индекса HI в узких спектральных диапазонах длин волн 1,73, 2,095 и 2,33 мкм. Показано, что в этом случае для относительного среднеквадратического значения шума измерения 3 % рефлектометрический метод мониторинга нефтяных загрязнений может потенциально обеспечить вероятность правильного обнаружения, равную $\sim 0,92$, при вероятности ложных тревог $\sim 0,03$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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>
- [2] 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>
- [3] Adegboye M.A., Fung W.-K., Karnik A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 11, art. 2548. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19112548>
- [4] Sivokon S., Andreev N.N. Laboratory assessment of the efficiency of corrosion inhibitors at oilfield pipelines of the West Siberia Region I. Objective setting I. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 65–79.
DOI: <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2012-1-1-065-079>
- [5] Spandonidis C., Theodoropoulos P., Giannopoulos F. A combined semi-supervised deep learning method for oil leak detection in pipelines using IIOT at the edge. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 11, art. 4105. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22114105>
- [6] Oyedeko K.F.K., Balogun H.A. Modeling and simulation of a leak detection for oil and gas pipelines via transient model: a case study of the Niger delta. *IJETP*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 16–28.
- [7] Zhang J., Hoffman A., Kane A., et al. Development of pipeline leak detection technologies. *10th Int. Pipeline Conf.*, 2014, vol. 1, paper IPC2014-33619.
DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33619>
- [8] Zhang J., Kane F. Leak detection and operations management in offshore pipelines. *11th Inter. Pipeline Conf.*, 2016, vol. 3, paper IPC2016-64488.
DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64488>
- [9] Lotfinasabasl S., Gunale V., Rajurkar N. Petroleum hydrocarbons pollution in soil and its bioaccumulation in mangrove species. *Avicennia marina* from Alibaug Mangrove Ecosystem, Maharashtra, India. *Int. J. Adv. Res. Tech.*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 1–7.
- [10] Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л. и др. 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. EDN: PWJDHD
- [11] 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>
- [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] Hussein A.E., Marzouk A. Characterization of petroleum crude oils using laser induced fluorescence. *J. Pet. Environ. Biotechnol.*, 2015, vol. 6, no. 5, art. 1000240. DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000240>
- [14] 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>
- [15] 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: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-05-54-61>
- [16] Horig B., Kuhn F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. *Int. J. Remote Sens.*, 2001, vol. 22, no. 8, pp. 1413–1422. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160120909>
- [17] Kühn F., Oppermann K., Hörig B. Hydrocarbon index — an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *Int. J. Remote Sens.*, 2004, vol. 25, no. 12, pp. 2467–2473. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160310001642287>
- [18] Andreoli G., Bulgarelli B., Hosgood B., et al. Hyperspectral analysis of oil and oil-impacted soils for remote sensing purposes. URL: https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-HSI_for_Oil_and_Spills-2007.pdf (дата обращения: 22.01.2024).
- [19] Allen C.S., Satterwhite M.B. Reflectance spectra of three liquid hydrocarbons on a common sand type. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6233. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.665586>
- [20] Allen C.S., Krekeler M.P.S. Reflectance spectra of crude oils and refined petroleum products on a variety of common substrates. *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7687. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.852200>
- [21] Tian Q. Study on oil-gas reservoir detecting methods using hyperspectral remote sensing. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sc.*, 2012, vol. XXXIX-B7, pp. 157–162. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-157-2012>
- [22] Pelta R., Ben-Dor E. An exploratory study on the effect of petroleum hydrocarbon on soils using hyperspectral longwave infrared imagery. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 5, art. 569. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11050569>
- [23] Del’Papa R., Scafutto M., de Souza Filho C.R., et al. Hyperspectral remote sensing detection of petroleum hydrocarbons in mixtures with mineral substrates: implications for onshore exploration and monitoring. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2017, vol. 128, pp. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.009>
- [24] Keskin G., Teutsch C.D., Lenz A., et al. Concept of an advanced hyperspectral remote sensing system for pipeline monitoring. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9644. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2194973>

[25] Achard V., Foucher P.Y., Dubucq D. Hydrocarbon pollution detection and mapping based on the combination of various hyperspectral imaging processing tools. *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, no. 5, art. 1020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13051020>

Барышников Николай Васильевич — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «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 — аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

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).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Барышников Н.В., Нгуен Минь Бач, Белов М.Л. Исследование эффективности рефлектометрического метода обнаружения разливов нефтепродуктов в ближнем ИК-диапазоне. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 4 (153), с. 4–17. EDN: MMLCAN

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF REFLECTOMETRIC METHOD OF OIL PRODUCT SPILL DETECTION IN NEAR-IR RANGE

N.V. Baryshnikov
Nguyen Minh Bach

baryshnikov@bmstu.ru
nguyenminhbach61097vt@gmail.com

M.L. Belov

belov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of this article is to investigate the effectiveness of a prospective reflectometric method for detecting oil product spills on the ground surface in the near-IR spectral range was conducted, utilizing experimentally acquired reflection spectra as a basis. The results of mathematical simulation of efficiency of the reflectometric monitoring method by equipment with different spectral resolution for the ground surface with different elements of landscape are presented. The mathematical simulation used spectra of reflection of various types of soil contaminated with oil, diesel fuel and gasoline, and spectra of reflection

Keywords

Optical monitoring, reflectometric method, oil contamination detection

of clean (uncontaminated oil products) of various types of sand, clay, clay loam, fresh conifer and deciduous vegetation, dry conifer and deciduous vegetation, moss, lichens, pastures, swamps. The best results for the detection of oil contamination on the ground surface are when narrow spectral bands near wavelengths of 1.73, 2.095, and 2.33 μm are used to calculate the hydrocarbon index. It is shown that in this case for the relative square mean noise value of 3 % the reflectometric oil pollution monitoring method can potentially provide a probability of correct detection of oil pollution ~ 0.92 and a probability of false alarms ~ 0.03

Received 03.04.2024

Accepted 11.06.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] 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>
- [2] 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>
- [3] Adegboye M.A., Fung W.-K., Karnik A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 11, art. 2548. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19112548>
- [4] Sivokon S., Andreev N.N. Laboratory assessment of the efficiency of corrosion inhibitors at oilfield pipelines of the West Siberia Region I. Objective setting I. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 65–79.
DOI: <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2012-1-1-065-079>
- [5] Spandonidis C., Theodoropoulos P., Giannopoulos F. A combined semi-supervised deep learning method for oil leak detection in pipelines using IIOT at the edge. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 11, art. 4105. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22114105>
- [6] Oyedeko K.F.K., Balogun H.A. Modeling and simulation of a leak detection for oil and gas pipelines via transient model: a case study of the Niger delta. *IJETP*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 16–28.
- [7] Zhang J., Hoffman A., Kane A., et al. Development of pipeline leak detection technologies. *10th Int. Pipeline Conf.*, 2014, vol. 1, paper IPC2014-33619.
DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33619>
- [8] Zhang J., Kane F. Leak detection and operations management in offshore pipelines. *11th Inter. Pipeline Conf.*, 2016, vol. 3, paper IPC2016-64488.
DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64488>

- [9] Lotfinasabasl S., Gunale V., Rajurkar N. Petroleum hydrocarbons pollution in soil and its bioaccumulation in mangrove species. *Avicennia marina* from Alibaug Mangrove Ecosystem, Maharashtra, India. *Int. J. Adv. Res. Tech.*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 1–7.
- [10] Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., et al. Method of detection of oil pollution on the Earth's surface based on fluorescence radiation recording within three narrow spectral bands. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2013, vol. 26, no. 3, pp. 208–212 (in Russ.). EDN: PWJDHD
- [11] 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>
- [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] Hussein A.E., Marzouk A. Characterization of petroleum crude oils using laser induced fluorescence. *J. Pet. Environ. Biotechnol.*, 2015, vol. 6, no. 5, art. 1000240. DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000240>
- [14] 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>
- [15] Fedotov Yu.V., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Remote laser fluorescence method for oil leak detection at an excitation wavelength of 266 nm. *J. Opt. Technol.*, 2022, vol. 89, no. 5, pp. 286–290. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000286>
- [16] Horig B., Kuhn F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. *Int. J. Remote Sens.*, 2001, vol. 22, no. 8, pp. 1413–1422. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160120909>
- [17] Kühn F., Oppermann K., Horig B. Hydrocarbon index — an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *Int. J. Remote Sens.*, 2004, vol. 25, no. 12, pp. 2467–2473. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160310001642287>
- [18] Andreoli G., Bulgarelli B., Hosgood B., et al. Hyperspectral analysis of oil and oil-impacted soils for remote sensing purposes. Available at: https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-HSI_for_Oil_and_Spills-2007.pdf (accessed: 22.01.2024).
- [19] Allen C.S., Satterwhite M.B. Reflectance spectra of three liquid hydrocarbons on a common sand type. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6233. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.665586>
- [20] Allen C.S., Krekeler M.P.S. Reflectance spectra of crude oils and refined petroleum products on a variety of common substrates. *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7687. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.852200>
- [21] Tian Q. Study on oil-gas reservoir detecting methods using hyperspectral remote sensing. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sc.*, 2012, vol. XXXIX-B7, pp. 157–162. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-157-2012>

[22] Pelta R., Ben-Dor E. An exploratory study on the effect of petroleum hydrocarbon on soils using hyperspectral longwave infrared imagery. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 5, art. 569. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11050569>

[23] Del’Papa R., Scafutto M., de Souza Filho C.R., et al. Hyperspectral remote sensing detection of petroleum hydrocarbons in mixtures with mineral substrates: implications for onshore exploration and monitoring. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2017, vol. 128, pp. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.009>

[24] Keskin G., Teutsch C.D., Lenz A., et al. Concept of an advanced hyperspectral remote sensing system for pipeline monitoring. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9644. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2194973>

[25] Achard V., Foucher P.Y., Dubucq D. Hydrocarbon pollution detection and mapping based on the combination of various hyperspectral imaging processing tools. *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, no. 5, art. 1020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13051020>

Baryshnikov N.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Laser and Optoelectronic Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Nguyen Minh Bach — Post-Graduate Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

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

Please cite this article in English as:

Baryshnikov N.V., Nguyen Minh Bach, Belov M.L. Investigation of efficiency of reflectometric method of oil product spill detection in near IR range. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 4 (153), pp. 4–17 (in Russ.). EDN: MMLCAN