НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ НЕФТЯНЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

NEW METHOD TO DEFINE SOIL POLLUTION LEVEL
WITH CRUDE OIL HYDROCARBONS BY USING DATA
OF VEGETATIONS REFLECTION SPECTRUM

Н.З. Мурсалов
Nemat Z. Mursalov

Азербайджанский
научно-исследовательский
институт водных проблем,
г. Баку,
Азербайджанская Республика

Azerbaijan Scientific Research
Institute of Water Problems,
Baku, Republic of Azerbaijan

Р.А. Эминов
Ramiz A. Eminov

Азербайджанский
государственный университет
нефти и промышленности,
г. Баку,
Азербайджанская Республика

Azerbaijan State Oil
and Industrial University,
Baku, Republic of Azerbaijan

А.Э. Ибрагимова
Arzu E. Ibragimova

Азербайджанский
государственный университет
нефти и промышленности,
г. Баку,
Азербайджанская Республика

Azerbaijan State Oil
and Industrial University,
Baku, Republic of Azerbaijan

Н.Г. Джавадов
Natiq H. Djavadov

ПО «Промавтоматика»,
г. Баку,
Азербайджанская Республика

Industrial Association
«Promavtomatika»,
Baku, Republic of Azerbaijan

В статье предложен новый метод определения степени загрязнения почвы нефтяными углеводородами с использованием данных отражательных спектров растительности. Известно, что растительность, находящаяся в местности, загрязненной нефтяными углеводородами, подвергается стрессу, что, в свою очередь, ослабляет отражательные способности поверхности растительности. Анализ результатов экспериментальных исследований зависимости сигнала отражательного спектра от длины волны показал наличие специальных зон длин волн, в которых разности отраженных сигналов от сильно и слабо загрязненных участков имеют соответственно положительный и отрицательный знаки. Выдвинуто предположение, что величина указанной положительной разности пропорциональна степени загрязнения почвы и может быть использована для дистанционной оценки степени загрязненности почвы. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность выдвинутых предположений, обоснована возможность реализации предлагаемого метода оценки степени загрязнения почвы по величине разности отраженных сигналов от двух длин волн. С учетом того, что при осуществлении дистанционного зондирования одной из основных проблем при обработке данных является правильный учет, или компенсация мешающих компонент суммарного сигнала, возникающего из-за воздействия отдельных компонент атмосферы, дана оценка

Ключевые слова

отражательный спектр,
углеводороды,
загрязнение,
дистанционное зондирование,
разностный спектр

влияния шумовых факторов на точность определения степени загрязнения почвы. Показано, что предлагаемый двухволновой метод обладает более высокой точностью по сравнению с известным одноволновым методом, поскольку осуществляется взаимная компенсация мешающих шумовых аддитивных составляющих сигнала.

In the article a new method to define the level of pollution of soil with crude oil hydrocarbons using the data of reflection spectrum of vegetation is described. It is known that vegetation located at the area polluted by crude oil hydrocarbons is affected by stress condition which in its turn weakens the reflection capability of vegetation. The analysis of results of known experimental researches of dependence of signals of reflection spectrum on wavelengths has shown the presence of special zones of wavelengths where the difference of reflected signals from the heavily and lightly polluted areas have appropriately positive or negative sign. It is suggested that value of said positive difference is proportional to level of pollution of soil and can be used for remote estimation of soil pollution level. The analysis of results of known experimental researches confirmed the authenticity of such suggestions and show the possibility of realization of proposed method of estimation of soil pollution level depending on value of difference of reflected signals on two wavelengths. Taking into account that one of major problems on processing of data of remote sensing is true accounting or compensation of hindering components of sum signal generated due to negative effect of sum components of atmosphere upon remote sensing the estimation of effect of noise factors on accuracy of determination of soil pollution level is given. It is shown that the suggested two wavelength method has a much more accuracy in comparison with known one wavelength method due to joint compensation of hindering noisy additive components of signal.

Key words

reflection spectrum,
hydrocarbons, pollution,
remote sensing,
difference spectrum

Согласно отчету Европейского агентства по окружающей среде (ЕЕА) за 2007 г. загрязнение почвы тяжелыми металлами и нефтью составляло соответственно 37,3 % и 33,7 % от всех случаев загрязнения почвы [1]. Первые публикации по использованию дистанционного зондирования для обнаружения утечек нефти и газа появились в 1970-х годах, когда первоначально применялся метод аэрофотографирования [2].

Согласно [3, 4], в настоящее время для обнаружения загрязнений нефтью и нефтепродуктами широко используются ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, а также различные микроволновые сенсоры. Существуют методы дистанционного зондирования для обнаружения мест утечек магистральных нефтепроводов. К данным методам можно отнести самолетные и спутниковые радары, лидары, гипер- и мультиспектральные измерители [5]. Как было показано в работе [6], попадание нефти в почву может вызвать состояние стресса растений.

Как отмечается в работе [7], наличие тесной взаимосвязи между концентрацией пигментов в растительности и ее отражательными свойствами обуславливает роль отражательной спектроскопии в качестве средства

для предсказания стресса растений из-за загрязнения нефтяными углеводородами. При этом, согласно [8], легкие типы нефти воздействуют на растительность более сильно, чем тяжелые виды нефти. Это связано с тем, что у тяжелой нефти частично преобладают высокомолекулярные весовые компоненты, которые трудно транспортируются и распределяются в пределах растительности. Кроме того, легкая нефть менее вязкая и хорошо фильтруется через почву и корни растений. Стресс растений после воздействия нефти возникает из-за токсичности таких ее компонентов, как ароматические соединения [9].

В качестве примера на рисунке 1 показаны отражательные спектры растения типа *Salicornia virginica* при воздействии легкой нефти Escravos при разных уровнях токсичности воздействия (L — слабое воздействие, H — сильное воздействие, C — контрольный образец). Разности отражательных сигналов (L–C) и (H–C) показаны на рисунке 1, b. Как видно из кривых, показанных на рисунке 1, b, в диапазоне 700–1400 нм разностные сигналы (L–C) и (H–C) двухполярные.

Подобные результаты были получены и при использовании в качестве воздействующего фактора нефти типа Alba (рисунок 2).

а) отражательные спектры; б) разностные спектры

Рисунок 1. Отражательные и разностные спектры при воздействии на растения типа *Salicornia Virginica* легкой нефти Escravos

а) отражательные спектры; б) разностные спектры

Рисунок 2. Отражательные и разностные спектры при воздействии на растения типа *Salicornia Virginica* нефти Alba

Как видно из спектральных разностных кривых, показанных на рисунке 2, *b*, в диапазоне длин волн 750–950 нм разностный сигнал может быть разнополярным в зависимости от степени загрязненности нефтью.

Отметим, что исследования, проведенные в [7–9], показывают универсальность этого свойства воздействия нефти на отражательные характеристики растений.

Также отметим, что поскольку в [1–3] представлены лабораторные эксперименты, то для применения результатов в технике дистанционного зондирования их необходимо методологически переработать. Вместе с тем, остается открытым вопрос о пригодности сигналов (L–С) и (Н–С), показанных на рисунках 1 и 2, для количественной оценки степени загрязнения.

Одной из основных проблем при обработке данных дистанционного зондирования является правильный учет или компенсация мешающих компонент суммарного сигнала, которые возникают вследствие воздействия отдельных компонент атмосферы (т.е. помех) при осуществлении дистанционного зондирования.

Допустим нам известны характеристики:

$$x = f_{\lambda_i}(R(\lambda_i)), \quad (1)$$

где x — общее количество углеводов в почве, мг/кг;

R — величина отраженной радиации;

i — номер длины волны зондирования, значения i в смысле выбора длины волны показаны в таблице 1.

Таблица 1. Длина волны

i	λ
1	470 nm
2	680 nm

Для вычисления зависимости степени загрязнения нефтью почвы осуществляются следующие операции:

1. вычисление обратных функций:

$$R(\lambda_i) = f_{\lambda_i}^{-1}(x), \quad i = \overline{1, 2};$$

2. вычисление степени загрязнения почвы k_j по формуле:

$$k_j = \frac{f_{\lambda_i}^{-1}(x_j) - f_{\lambda_i}^{-1}(x_0)}{f_{\lambda_i}^{-1}(x_m) - f_{\lambda_i}^{-1}(x_0)}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где m — количество фиксированных значений концентрации ТРН в почве;

3. строится кривая зависимости:

$$k = \varphi(x). \quad (3)$$

Приведем практический пример использования вышеизложенной методики. Для этого воспользуемся результатами экспериментальных исследований, приведенных в [4].

На рисунках 3 и 4 представлены корреляционные кривые, показывающие зависимость от концентрации техногенных радионуклидов (ТРН) в почве спектральных отражений на длинах волн $\lambda_1 = 470$ нм и $\lambda_2 = 800$ нм, полученных при исследовании растительности типа *Phragmites australis* с использованием полевого спектрорадиометра ASD Fieldspec FR [4].

Рисунок 3. Гоафик корреляционной зависимости концентрации ТРН от сигнала отражения на длине волны 470 нм

Рисунок 4. График корреляционной зависимости концентрации ТРН в почве от сигнала отражения растительности на длине волны 800 нм

Проведем на основании графиков, представленных на рисунках 3 и 4, вычисления значения k :

$$\text{при } x_1 = \text{ТРН}_1 = 200 \text{ мг/кг } k_1 = \frac{5 - 6,5}{2,5 - 3} = \frac{1,5}{0,5} = 3;$$

$$\text{при } x_2 = \text{ТРН}_2 = 300 \text{ мг/кг } k_2 = \frac{6,5 - 10}{-0,5} = 7;$$

$$\text{при } x_3 = \text{ТРН}_3 = 400 \text{ мг/кг } k_3 = \frac{8,5 - 15}{-0,5} = 13.$$

Очевидно, что при $x_0 = \text{ТРН}_0 = 0$ получим

$$k_0 = \frac{2,5 - 3}{2,5 - 3} = 1.$$

График зависимости вычисленных величин k от значения концентрации ТРН в почве приведен на рисунке 5.

Как видно из графика (рисунок 5), в диапазоне ТРН 0-400 мг/кг рост степени загрязнения растительности происходит без эффектов насыщения. При аппроксимации линейной функцией функции $k = \varphi(\text{ТРН}_x)$ по методу наименьших квадратов получим следующую регрессионную зависимость:

$$k = 0,03 \text{ТРН} + 1.$$

Рисунок 5. График зависимости степени загрязнения растительности от концентрации ТРН в почве

Таким образом, показано, что предлагаемый двухволновой метод позволяет определить зависимость загрязнения растительности нефтью от концентрации ТРН в почве. Посмотрим, насколько сильно ослабляются при этом шумовые составляющие сигнала, имеющиеся в составе отраженного сигнала, при дистанционном зондировании растительности. В упрощенном случае функцию (1) с учетом влияния атмосферы определим как

$$x = f_{\lambda}(R(\lambda) + R_m(\lambda)). \quad (4)$$

Из (4) получим

$$R(\lambda) + R_m(\lambda) = f_{\lambda}^{-1}(x) \quad (5)$$

или $R(\lambda) = f_{\lambda}^{-1}(x) - R_m(\lambda)$.

При использовании двухволнового метода согласно (2) имеем:

$$k_j = \frac{f_{\lambda_1}^{-1}(x_j) - R_m(\lambda_1) - f_{\lambda_2}^{-1}(x_j) + R_m(\lambda_2)}{f_{\lambda_1}^{-1}(x_0) - R_m(\lambda_1) - f_{\lambda_2}^{-1}(x_0) + R_m(\lambda_2)}. \quad (6)$$

Как видно из выражения (6), при $R_m(\lambda_1) \approx R_m(\lambda_2)$ происходит почти полное подавление влияния шумовых сигналов атмосферного происхождения.

Относительно практической реализации предлагаемого метода оценки степени загрязнения почвы нефтью отметим, что на практике изначально трудно определить место, где загрязнение почвы нулевое, т.е. вычисление знаменателя в формуле (2) будет представлять определенную трудность. Во избежание этой

проблемы измерения можно проводить не относительно участка с нулевым загрязнением, а относительно участка с фиксированными географическими координатами.

Выводы

1. Анализ результатов известных экспериментальных исследований зависимости сигнала отражательного спектра от длины волны показал наличие особых зон длин волн, в которых разность отраженных сигналов от сильно и слабо загрязненных участков имеет соответственно положительный и отрицательный знаки. Выдвинуто предположение, что величина указанной положительной разности пропорциональна степени загрязнения почвы и может быть использована для дистанционной оценки степени загрязненности почвы.

2. Обоснована верность предположения о пропорциональности степени загрязнения почвы величине положительной разности отраженных сигналов. Показана возможность реализации предложенного метода оценки степени загрязнения почвы в зависимости от величины разности отраженных сигналов на двух длинах волн.

3. Показано, что предложенный двухволновой метод обладает более высокой точностью по сравнению с известным одноволновым методом вследствие возможности взаимной компенсации мешающих шумовых аддитивных составляющих сигнала.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. EEA Report. 2007.
2. Casciello D., Lacava T., Pergola N., Tramutoli V. Robust Satellite Techniques (RST) for Oil Spill Detection and Monitoring // International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, 1-6, Leuven, July 18-20. Multitemp 2007. IEEE. 2007. DOI:10.1109/MULTITEMP.2007.4293040.
3. Brekke C., Solberg A.H.S. Oil Spill Detection by Satellite Remote Sensing // Remote Sensing of Environment. 2005. No. 95. P. 1013. doi:10.1016/j.rse.2004.11.015.
4. Brown C.E., Fingas M.F. Review of the Development of Laser Fluorosensors for Oil Spill Application // Marine Pollution Bulletin. 2003. Vol. 47. P. 477-484.
5. Uha M.N., Levy J., Gao Y. Advances in Remote Sensing for Oil Spill Disaster Management. State-Of-The-Art Sensors Technology for Oil Spill Surveillance // Sensors. 2008. No. 8. P. 236-255. DOI: 10.3390/s8010236.
6. Noomen M.F., Hakkarainen A., van der Meijde, H.M.A. van der Werff. Evaluating the Feasibility of Multi-Temporal Hyperspectral Remote Sensing for Monitoring Bioremediation // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. No. 34. P. 217-225. DOI: 10.1016/j.jag.2014.08.016.
7. Rosso P.H., Pushnik J.C., Ustin S.L. Reflectance Properties and Physiological Responses of Salicornia Virginica to Heavy Metal and Petroleum Contamination // Environmental Pollution. 2005. September. Vol. 137. Issue 2. P. 241-252.
8. Pezeshki S.R., Hester M.W., Lin Q. et al. The Effects of Oil Spill and Clean-Up on Dominant U.S. Gulf Coast Marsh Macrophytes: a Review // Environ. Poll. 2000. No. 108. P. 129-139.
9. Suprayogi B., Murray F. A Field Experiment of the Physical and Chemical Effects of Two Oils on Mangroves // Environ. Exp. Bot. 1999. No. 42. P. 221-229.
10. Linhai Zhu, Xuechun Zhao, Liming Lai, Jianjian Wang, Lianhe Jiang, Jinzhi Ding, Nanxi Liu, Yunjiang Yu, Junsheng Li, Nengwen Xiao, Yuanrun Zheng, Glyn M. Soil TPH Concentration Estimation Using Vegetation Indices in an Oil Polluted Area of Eastern China // Rimmington PLOS ONE, www.plosone.org. 11 January 2013. Vol. 8. Issue 1. e54028.

REFERENCES

1. EEA Report. 2007.
2. Casciello D., Lacava T., Pergola N., Tramutoli V. Robust Satellite Techniques (RST) for Oil Spill Detection and Monitoring. *International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*, 1–6, Leuven, July 18–20. Multitemp 2007. IEEE. 2007. DOI:10.1109/MULTITEMP.2007.4293040.
3. Brekke C., Solberg A.H.S. Oil Spill Detection by Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2005, No. 95, pp. 1013. doi:10.1016/j.rse.2004.11.015.
4. Brown C.E., Fingas M.F. Review of the Development of Laser Fluorosensors for Oil Spill Application. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, Vol. 47, pp. 477–484.
5. Uha M.N., Levy J., Gao Y. Advances in Remote Sensing for Oil Spill Disaster Management. State-Of-The-Art Sensors Technology for Oil Spill Surveillance. *Sensors*, 2008, No. 8, pp. 236–255. DOI: 10.3390/s8010236.
6. Noomen M.F., Hakkarainen A., van der Meijde, H.M.A. van der Werff. Evaluating the Feasibility of Multi-Temporal Hyperspectral Remote Sensing for Monitoring Bioremediation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, No. 34, pp. 217–225. DOI: 10.1016/j.jag.2014.08.016.
7. Rosso P.H., Pushnik J.C., Ustin S.L. Reflectance Properties and Physiological Responses of *Salicornia virginica* to Heavy Metal and Petroleum Contamination. *Environmental Pollution*, 2005, September, Vol. 137, Issue 2, pp. 241–252.
8. Pezeshki S.R., Hester M.W., Lin Q. et al. The Effects of Oil Spill and Clean-Up on Dominant U.S. Gulf Coast Marsh Macrophytes: a Review. *Environ. Poll.*, 2000, No. 108, pp. 129–139.
9. Suprayogi B., Murray F. A Field Experiment of the Physical and Chemical Effects of Two Oils on Mangroves. *Environ. Exp. Bot.*, 1999, No. 42, pp. 221–229.
10. Linhai Zhu, Xuechun Zhao, Liming Lai, Jianjian Wang, Lianhe Jiang, Jinzhi Ding, Nanxi Liu, Yunjiang Yu, Junsheng Li, Nengwen Xiao, Yuanrun Zheng, Glyn M. Soil TPH Concentration Estimation Using Vegetation Indices in an Oil Polluted Area of Eastern China. *Rimington PLOS ONE*, www.plosone.org. 11 January 2013, Vol. 8, Issue 1, e54028.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Мурсалов Немат Закир оглы, докторант Института водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика

Nemat Z. Mursalov, Doctorant of Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: mursalov95@mail.ru

Эминов Рамиз Ахмед оглы, канд. техн. наук, доцент кафедры «Поиск и разведка месторождений нефти и газа», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Ramiz A. Eminov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Search and Survey of Oil and Gas Deposits Department, Azerbaijan State Oil and Industrial University, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: eminovramiz@mail.ru

Ибрагимова Арзу Эльдар гызы, канд. техн. наук, доцент кафедры «Инженерное приборостроение», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Arzu E. Ibragimova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Engineering Instrumentation Department, Azerbaijan State Oil and Industrial University, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: arzuibragimova@mail.ru

Джавадов Нати́г Гаджи оглы, д-р техн. наук, профессор, генеральный директор ПО «Промавтоматика», г. Баку, Азербайджанская Республика

Natiq H. Djavadov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, General Director of Industrial Association «Promavtomatika», Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: Javadovng@rambler.ru