

УДК 581.524; 504.53

**ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ
ОЦЕНКИ ОБЪЕМА СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОЧВЫ В ЗОНАХ
ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

**GRAPHO-ANALYTICAL METHOD FOR QUANTITATIVE
ESTIMATION OF SPECTRAL MEASUREMENTS VOLUME
FOR SOIL CONTAMINATION STUDY
IN AREAS OF HYDROCARBONS TRANSPORTATION**

Х.М. Насиров

**Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики,
г. Баку, Азербайджанская Республика**

Habib M. Nasirov

State Oil Company of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: nasirovhabib@mail.ru

Аннотация. Изложены теоретические и методические основы предложенного графо-аналитического метода определения необходимого количества спектральных измерений на земляных участках, прилегающих в зоне прохождения магистральных нефтепроводов. За основу разработанного метода взяты результаты исследований регрессионных зависимостей между (а) величиной индекса *NDVI* и объемом разлитой нефти и (б) между текущей величиной индекса *NDVI* и временем, прошедшим с момента события разлива. Для анализа введен коэффициент идентичности, определенный в качестве отношения *NDVI* рассматриваемого участка к значению того же индекса на базовом типичном участке. Показано, что объем необходимых спектральных измерений,

проводимых для дальнейших ремедиационных работ, зависит в значительной мере от относительной проницаемости земли в момент возникновения разлива нефти.

Abstract. The theoretical and methodological foundations of the proposed grapho-analytical method for determining the required number of spectral measurements on earthen areas adjacent to the main oil piping zone are presented. The developed method is based on the results of studies of regression relationships between (a) the value of the *NDVI* index and the volume of the spilled oil and (b) between the current value of the *NDVI* index and the time elapsed since the spill event. For the analysis, an identity coefficient defined as the ratio of the *NDVI* of the area under consideration to the value of the same index of the base typical area was introduced. It is shown that the value of necessary spectral measurements carried out for further remediation works depends largely on the relative permeability of the earth at the moment of the oil spill.

Ключевые слова: ремедиация; почва; загрязнение; углеводороды; спектральные измерения

Key words: remediation; the soil; pollution; hydrocarbons; spectral measurements

Введение

Для успешного планирования работ по ремедиации загрязненных земельных участков, находящихся в зонах прохождения магистральных нефтепроводов, важно знать, какой объем углеводородов был разлит на данном участке [1].

Например, если планируются работы по использованию микроорганизмов для биоремедиации почвы, то данные по объему разлитой

нефти позволяют правильно выбрать тип и количество таких микроорганизмов [2].

Вместе с тем, объем разлитой нефти часто неизвестен, что затрудняет эффективное применение биоремедиации для очистки земли от углеводородов [3]. Существующие косвенные методы обнаружения факта разлива нефти, такие как фиксация спада давления в трубопроводе, использование радиоактивных частиц, позволяют определить направление такого загрязнения, однако объем разлитой нефти определить фактически не удастся. Проводимые спутниковые измерения позволяют дистанционно исследовать поверхность земли, однако точно определить исходную площадь разлитой нефти не удастся из-за таких эффектов, как испарение легкой фракции углеводородов и проникновение нефти в глубь земли. Вместе с тем, из-за указанных эффектов на определенной толщине земляного покрова происходит загрязнение почвы тяжелыми металлами, для обнаружения которых необходимо осуществить взятие проб и провести лабораторные измерения. Таким образом, требуется разработать методику определения исходной площади загрязненного слоя почвы, подлежащей контрольным лабораторным измерениям, и определить объем требуемых спектральных измерений. Указанные вопросы в настоящей статье анализируются на основе результатов известных экспериментальных исследований [4–10].

Предлагаемый метод

Как отмечается в работе [4], для оценки площади разлившихся углеводородных продуктов, таких как дизель, бензин, реактивное топливо и т.д., необходимо иметь точные оценки скорости разлива, скорость проникновения в почву и время достижения углеводородами уровня грунтовых вод. Разработанный нами метод частично базируется на модели распространения углеводородов, изложенной в работе [4]. Согласно этой модели, учитываются два механизма распространения углеводородов:

1. Миграция углеводородов в пористую среду, т.е. в почву;
2. Испарение углеводородов, степень которого зависит от времени и температуры.

При этом основными положениями, легшими в основу данной модели, являются следующие [4]:

1. Испарение возникает с поверхности углеводородного слоя вплоть до проникновения их в почву;
2. Вязкость и плотность нефти считаются постоянными величинами;
3. Основным механизмом проникновения в почву является адвекция;
4. Полагаем, что участки потенциального разлива нефти различаются только по значению индекса $NDVI$. Вводится коэффициент идентичности участков, определяемый как $k_{ид} = NDVI_i / NDVI_0$, где $NDVI_i$ – индекс конкретного рассматриваемого участка; $NDVI_0$ – индекс типичного участка.

Разработанный нами метод также базируется на результатах работы [5], где исследованы вопросы влияния объема разлитой нефти на типичный участок земли на величину нормализованного дифференциального разностного индекса $NDVI$, определяемого по формуле [6]

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR – величина отраженного сигнала с растительности в зоне разлива в близком инфракрасном диапазоне; RED – величина отраженного сигнала в красном диапазоне.

При дальнейшем анализе считаем, что $k_{ид} = 1$. На рисунке 1 показана статистическая взаимосвязь между объемом разлитой нефти и величиной $NDVI$.

При этом вычисленная регрессионная линия определяется по формуле

$$NDVI = -0,5x \cdot 10^{-5} + 0,3465. \quad (2)$$

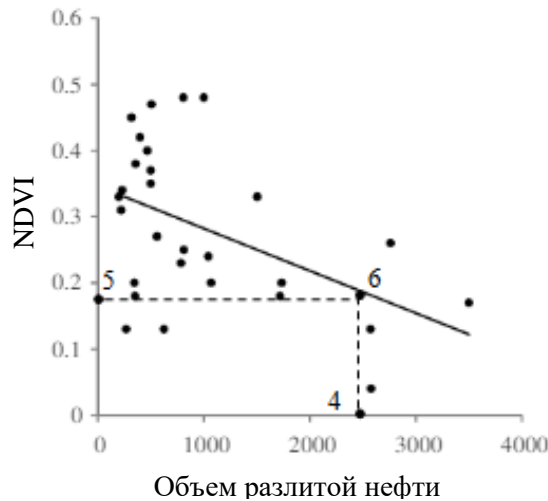


Рисунок 1. Регрессионная связь между величиной *NDVI* и объемом разлитой нефти в *bbl* ($1\text{ bbl} = 0,16\text{ м}^3$) [6]

Другим важным результатом, полученным в [5] и используемым в разработанной методике, является зависимость *NDVI* исследуемого участка от времени с момента разлива до момента проведения спектральных измерений *NDVI*. Результаты исследования регрессионной зависимости величины *NDVI* от времени, прошедшего с момента разлива до момента проведения измерений, представлены графически на рисунке 2.

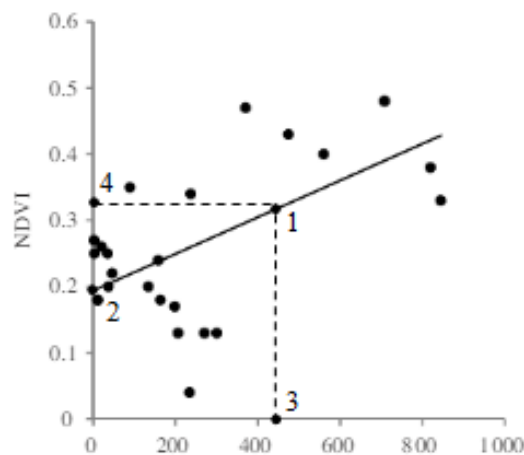


Рисунок 2. Регрессионная зависимость между величиной *NDVI* и временем, прошедшим с момента разлива до момента проведения измерений, мин [5]

Линия регрессионной зависимости между указанными показателями имеет вид [5]:

$$NDVI = 0,0003x + 0,2073. \quad (3)$$

Важным базовым элементом разработанного нами метода определения исходной площади участка разлитой нефти также является следующая формула, приведенная в работе [7]:

$$A_{\text{исх}} = \frac{0,23782 \cdot Q^{\frac{4}{5}}}{(k_i \cdot k_r)^{\frac{1}{5}}}, \quad (4)$$

где $A_{\text{исх}}$ – величина площади участка, покрытого разлитой нефтью (м^2);

Q – общее количество разлитой нефти (м^3);

k_i – исходная проницаемость почвы (м^3);

k_r – относительная проницаемость нефти.

Значения k_r приведены в таблице 1 [7]:

Таблица 1. Значения относительной проницаемости нефти

Состояние почвы	k_r
Сухая почва	1,0
Слегка влажная почва	0,9
Очень влажная почва	0,3
Полностью насыщенная влагой почва	0

С учетом вышеизложенного разработан метод определения исходной площади земельного участка, покрытого разлитой нефтью. Блок-схема алгоритма реализации метода показана на рисунке 3.

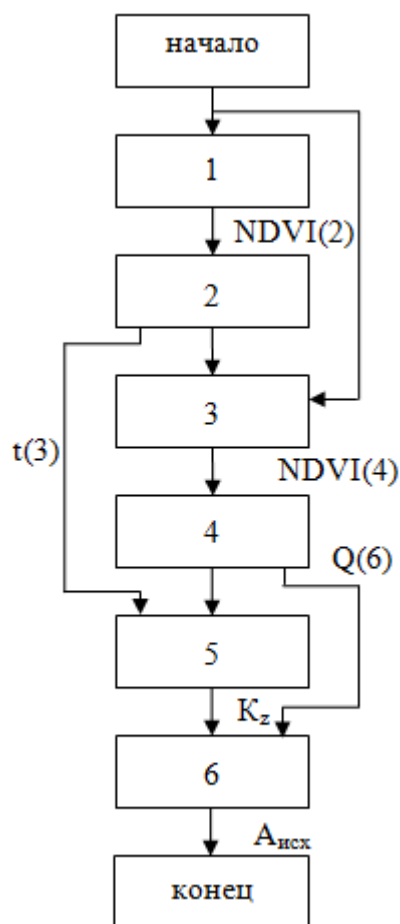


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма реализации предложенного метода

Дадим пояснение составных частей алгоритм предложенного метода:

1. Используя методы дистанционного или проксимального зондирования, определяется текущее значение $NDVI$ (2) исследуемого участка.

2. Используя регрессионную линию, показанную на рисунке 2, определяется временной промежуток после разлива до момента проведения измерений t (3).

3. Регрессионная линия, показанная на рисунке 2, экстраполируется влево до пересечения вертикальной оси, и определяется точка пересечение этой оси $NDVI$ (4).

4. Используя регрессионную линию, показанную на рисунке 1, определяем исходный объем разлитой нефти Q (6).

5. Используя известные метеорологические данные об осадках, определяется состояние почвы, на которой произошел разлив, – k_r .

6. На основании вычисленных по пунктам 4 и 6 величин и используя формулу [7], определяем исходную величину $A_{исх}$.

Модельное исследование

Проведем модельное исследование по определению исходной площади участка земли, первично покрытой разлитой нефтью. Как было отмечено выше, в проводимом анализе считаем, что $k_{ид} = 1$.

Примем, что измеренная величина $NDVI$ (2) равна 0,33. В этом случае с помощью графика, показанного на рисунке 2, определяем период времени, прошедшего после события разлива. В результате получим $t(3) = 450$. В результате экстраполяции линии, представленной на рисунке 2 влево, до пересечения с вертикальной осью получим $NDVI(4) = 0,19$, где $NDVI(4)$ – исходная величина указанного индекса непосредственно после события разлива.

Далее, с учетом вычисленного значения $NDVI(4)$, используя регрессионную линию, показанную на рисунке 1, определяем объем разлитой нефти $Q = 2600 \text{ bbl}$.

Для вычисления $A_{исх}$ по формуле (4) определим величину Q в м^3 . С учетом $1 \text{ м}^3 = 1000 \text{ л}$ и $1 \text{ bbl} = 160 \text{ л}$ получим $1 \text{ bbl} = 0,160 \text{ м}^3$. Следовательно величина Q составит 416 м^3 .

С учетом $k_i = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ [8] получим:

$$A_{исх} = \frac{0,23782 \cdot (416 \text{ м}^3)^{\frac{4}{5}}}{(1,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 \cdot 1)^{\frac{1}{5}}} = \frac{0,238 \cdot 20 \text{ м}^{\frac{12}{5}}}{3 \cdot (10^{-2\frac{4}{5}})} = 0,238 \cdot 20 \cdot 40 \cdot 400 \cdot \text{м}^3 \approx \approx 2 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

Таким образом, согласно проведенным приблизительным подсчетам, разлив 160 л нефти приведет к загрязнению земельного участка площадью 2000 м^2 .

Следовательно, если планируется проведение измерений значения $NDVI$ на каждом под участке площадью 100 м^2 , то общее количество измерений определим как

$$N_0 = 2 \cdot \frac{2000}{100} = 40.$$

Как видно из проведенного анализа, при вышеприведенных допущениях необходимо проведение 40 измерений в NIR области и 40 в RED области. При этом количество необходимых измерений сильно зависит от относительной проницаемости как почвы, так и нефти.

Так, увеличение одного из этих показателей в $2^{\frac{4}{5}}$ раза привело бы к двукратному увеличению количества необходимых измерений.

Вывод

Изложены теоретические основы разработанного графо-аналитического метода определения требуемого объема спектральных измерений на земляном участке, покрытом разлитой нефтью. В основу разработанного метода положены известные регрессионные зависимости между (а) величиной индекса $NDVI$ и объемом разлитой нефти и (б) между текущей величиной индекса $NDVI$ и временем, прошедшим с момента события разлива. Получена формула для вычисления необходимого количества измерений с учетом вычисляемой площади земли, исходно покрытой разлитой нефтью. Показано, что объем необходимых спектральных измерений, проводимых для дальнейших ремедиационных работ, значительно зависит от относительной проницаемости земли в момент возникновения разлива нефти. Полученные в статье результаты могут быть использованы при планировании ремедиационных работ в зонах прохождения нефтепроводов, а также на территориях нефтепроизводства.

Список используемых источников

1. Mode A.W., Amobi J.O., Salufu S.O. A Model for Predicting Rate and Volume of Oil Spill in Horizontal and Vertical Pipelines // Journal of Environment and Earth Science. 2013. Vol. 3. No. 9. P. 12-20.
2. Farhadian M., Duchez D., Vachelard C., Larroche C. Accurate Quantitative Determination of Monoaromatic Compounds for the Monitoring of Bioremediation Processes // Bioresources Technology. 2009. Vol. 100. Issue 1. P. 173-178. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.05.046.
3. Delaune R.D., Smith C.J., Patrick W.H., Fleeger W.J., Tolly W.D. Effect of Oil on Salt Mandbiota: Method of Restoration of Environment // Pollution. 1984. Vol. 36. 1984. P. 207-227.
4. Grimaz S., Allen S., Stewart J.R., Dolcetti G. Fast Prediction of the Evolution of Oil Penetration into the Soil Immediately after an Accidental Spillage for Rapid-Response Purposes // Safety and Environment in Process Industry, CISAP-3: Proceeding of 3rd International Conference. Rome, Italy. 2008. P. 11-14. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.490.5601&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 25.05.2020).
5. Adamu B., Tansey K., Ogutu B. An Investigation into the Factors Influencing the Delectability of Oil Spills Using Spectral Indices in an Oil-Polluted Environment // International Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 37. Issue 10. P. 2338-2357 DOI: 10.1080/01431161.2016.1176271.
6. Fan X., Liu Y. A Global Study of NDVI Difference among Moderate-Resolution Satellite Sensors // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 121. P. 177-191. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.09.008.
7. Grimaz S., Allen S., Stewart J., Dolcetti G. Predictive Evaluation of the Extent of the Surface Spreading for the Case of Accidental Spillage of Oil on Ground // AIDIC Conference Series. 2007. Vol. 8. P. 151-160.

8. Swartjes F.A. Dealing with Contaminated Sites: from Theory towards Practical Application. Luxembourg: Springer Science and Business Media, 2011, 1104 p.

References

1. Mode A.W., Amobi J.O., Salufu S.O. A Model for Predicting Rate and Volume of Oil Spill in Horizontal and Vertical Pipelines. *Journal of Environment and Earth Science*, 2013, Vol. 3, No. 9, pp. 12-20.

2. Farhadian M., Duchez D., Vachelard C., Larroche C. Accurate Quantitative Determination of Monoaromatic Compounds for the Monitoring of Bioremediation Processes. *Bioresources Technology*, 2009, Vol. 100, Issue 1, pp. 173-178. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.05.046.

3. Delaune R.D., Smith C.J., Patrick W.H., Fleeger W.J., Tolly W.D. Effect of Oil on Salt Mandbiota: Method of Restoration of Environment. *Pollution*, 1984, Vol. 36, 1984, pp. 207-227.

4. Grimaz S., Allen S., Stewart J.R., Dolcetti G. Fast Prediction of the Evolution of Oil Penetration into the Soil Immediately after an Accidental Spillage for Rapid-Response Purposes. *Proceeding of 3rd International Conference «Safety and Environment in Process Industry, CISAP-3»*. Rome, Italy, 2008, pp. 11-14. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.490.5601&rep=rep1&type=pdf> (accessed 25.05.2020).

5. Adamu B., Tansey K., Ogutu B. An Investigation into the Factors Influencing the Delectability of Oil Spills Using Spectral Indices in an Oil-Polluted Environment. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, Issue 10, pp. 2338-2357 DOI: 10.1080/01431161.2016.1176271.

6. Fan X., Liu Y. A Global Study of NDVI Difference among Moderate-Resolution Satellite Sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 121, pp. 177-191. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.09.008.

7. Grimaz S., Allen S., Stewart J., Dolcetti G. Predictive Evaluation of the Extent of the Surface Spreading for the Case of Accidental Spillage of Oil on Ground. *AIDIC Conference Series*, 2007, Vol. 8, pp. 151-160.

8. Swartjes F.A. *Dealing with Contaminated Sites: from Theory towards Practical Application*. Luxembourg, Springer Science and Business Media, 2011, 1104 p.

Сведения об авторе

About the author

Насиров Хабиб Миргалиб оглы, старший специалист Управления экологии, Департамент биоразнообразия, Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика

Habib M. Nasirov, Senior Specialist of the Ecology Department, Biodiversity Department, State Oil Company of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: nasirovhabib@mail.ru