

МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОГО БАЛАНСА СИГНАЛОВ ДИСПЕРСИВНОГО И НЕДИСПЕРСИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОЧВЫ В ПРИБРЕЖНЫХ ЗОНАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

INFORMATIONAL BALANCE METHOD FOR DISPERSIVE
AND NON-DISPERSIVE REMOTE SENSING SIGNALS
FOR DETECTING OIL CONTAMINATION OF SOIL
IN COASTAL AREAS USING HYPERSPECTROMETERS

Х. Г. Асадов
Hikmat H. Asadov

Национальное
аэрокосмическое агентство,
г. Баку,
Азербайджанская Республика

Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan

Р. М. Рагимов
Rauf M. Rahimov

Национальное
аэрокосмическое агентство,
г. Баку,
Азербайджанская Республика

Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan

Л. Д. Абдуллаева
Latifa D. Abdullayeva

Национальное
аэрокосмическое агентство,
г. Баку,
Азербайджанская Республика

Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan

В статье представлен метод для обнаружения нефтяных загрязнений почвы в прибрежных зонах с применением бортовых гиперспектрометров — метод информационного баланса сигналов дисперсивного и недисперсивного зондирования, используемых соответственно для основных и валидационных измерений.

Дистанционное зондирование является потенциально перспективным методом для обнаружения различных типов загрязнений прибрежной природной среды, включая загрязнения нефтяными углеводородами. Общим принципом дистанционного зондирования является обязательное проведение валидации дистанционно полученных результатов.

Принципы и методы проведения валидационных измерений разнообразны и могут быть классифицированы по признакам: 1) синхронности основных и валидационных измерений; 2) автономности валидационных измерений; 3) выбора высоты проведения валидационных измерений.

Изложен операционный алгоритм предлагаемого метода.

Рассмотрен вариант совместного и синхронного проведения основных и валидационных измерений с помощью гиперспектрометра, установленного на низковысотном летательном аппарате.

Дано математическое обоснование используемого метода. На основе условия информационного баланса получено выражение для определения отношения сигнал/шум в системе с целью дальнейшего вычисления корреляции между узкополосным нефтяным индексом и широкополосным сигнатурным признаком аномальной концентрации тяжелых металлов.

The article presents a method for the detection of soil oil contamination in coastal areas using onboard hyperspectrometers — the signals informational balance method of dispersive and non-dispersive probing, used respectively for basic and validation measurements.

Remote sensing is a potentially promising method for detecting various types of coastal environment pollution, including pollution by petroleum

Ключевые слова

гиперспектрометр, валидация,
информация,
нефтяные углеводороды,
нефтяной индекс,
тяжелые металлы

Key words

hyperspectrometer, validation,
information, petroleum
hydrocarbons, oil index, heavy metals

hydrocarbons. The general principle of remote presentation is the obligatory carrying out of remotely validation obtained results.

The principles and methods of carrying out validation measurements are diverse and can be classified according to the following features: 1) synchronization of basic and validation measurements; 2) autonomy validation measurements; 3) select the height of the validation measurements.

The proposed method operational algorithm is described.

A variant of joint and synchronous basic and validation measurements using a hyperspectrometer installed on a low-altitude aircraft is considered.

The mathematical model of the used method is given. Based on the information balance condition, an expression is obtained for determining the signal-to-noise ratio in the system in order to further calculate the correlation between the narrow-band oil index and the broadband signature-based sign of the heavy metals anomalous concentration.

Дистанционное зондирование является потенциально перспективным методом для обнаружения различных типов загрязнений прибрежной природной среды, включая загрязнения нефтяными углеводородами. Общим принципом дистанционного зондирования является обязательное проведение валидации дистанционно полученных результатов.

Принципы и методы проведения валидационных измерений разнообразны и могут быть классифицированы следующим образом:

1. По признаку синхронности основных и валидационных измерений

- синхронные;
- асинхронные.

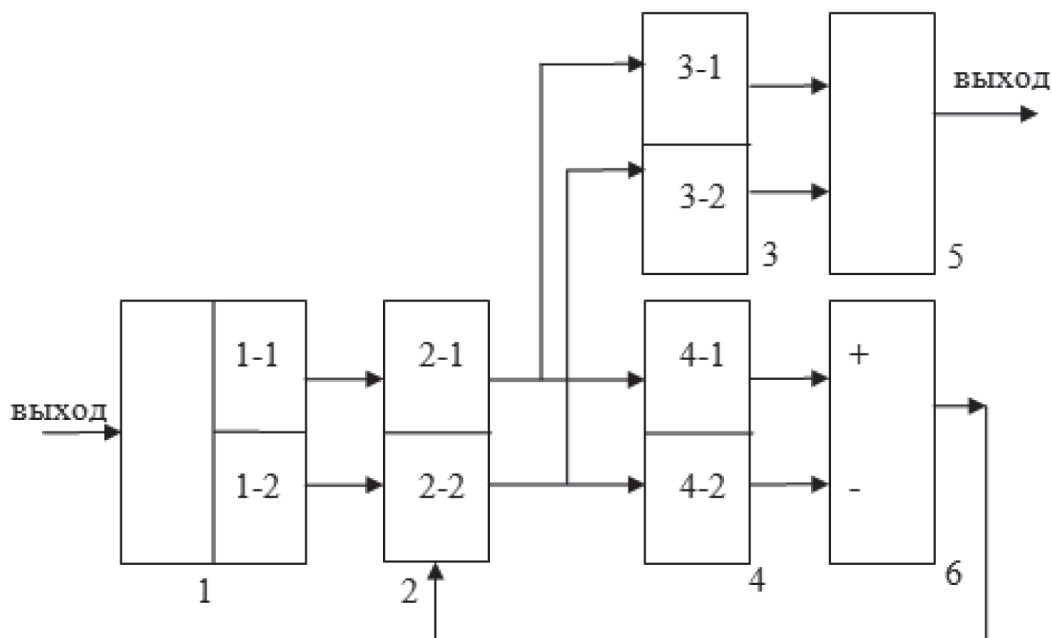
2. По признаку автономности валидационных измерений

- автономные;
- совместные с основными измерениями.

3. По признаку выбора высоты проведения валидационных измерений

- высотные измерения;
- низковисотные измерения.

Далее рассмотрим вариант совместного и синхронного проведения основных и валидационных измерений с помощью гиперспектрометра, установленного на низковисотном летательном аппарате. Блок-схема бортовой подсистемы гиперспектральных измерений показана на рисунке 1.



1 — гиперспектрометр; (1-1) — каналы, используемые для формирования узкополосного индекса нефти; (1-2) — каналы, используемые для формирования широкополосной сигнатуры аномального накопления тяжелых металлов; 2 — управляемый фильтр, регулирующий отношение сигнал/шум на выходах узлов (2-1) и (2-2); 4 — блок вычислителей количества информации в каналах (1-1) и (1-2); 3 — блок вычисления используемых индексов и спектральных сигнатур; (3-1) — узел вычисления спектрального углеводородного индекса; (3-2) — узел вычисления спектральной сигнатуры тяжелых металлов; 5 — корреляционный вычислитель; 6 — детектор информационного баланса

Рисунки 1. Блок-схема бортовой подсистемы гиперспектральных основных и валидационных измерений

Система работает следующим образом. После выбора используемого индекса нефти и спектральной сигнатуры аномального накопления тяжелых металлов определяются каналы гиперспектрометра, используемые для вычисления этих индексов. Фильтр 2 является управляемым в зависимости от полярности управляющего сигнала блока сравнения количества информации, содержащейся в каналах (1–1) и (1–2). При равенстве количества информации, используемой для формирования индекса нефти и спектральной сигнатуры тяжелых металлов, фильтр 2 формирует определенную величину отношения сигнал/шум в сигналах гиперспектрометра, на базе которых в блоке 3 вычисляются значения индексов и далее коэффициент корреляции между индексами.

При этом вычисленное значение корреляции считаем максимально достоверным в смысле равенства количества информации в основном и валидационном каналах измерений. Предлагаемый метод информационного баланса сигналов дисперсивного (узкополосного) и недисперсивного (широкополосного) дистанционного зондирования для обнаружения нефтяных загрязнений почвы может быть изложен в виде следующей *алгоритмической последовательности* выполняемых операций:

1. Выбор узкополосных индексных спектральных сигнатур в качестве признаков наличия нефти;
2. Выбор широкополосных спектральных сигнатур в качестве признаков избыточной загрязненности почвы тяжелыми металлами;
3. Определение каналов, предназначенных для измерения опорных величин, узкополосных спектральных индексов и широкополосных валидационных признаков наличия нефти;
4. Проведение дисперсивного дистанционного зондирования с применением соответствующих каналов гиперспектрометра и вычисление узкоспектральных сигнатур наличия нефти;
5. Проведение недисперсивного дистанционного зондирования с применением группового комбинирования каналов гиперспектрометра и вычисление широкополосных признаков тяжелых металлов;
6. Определение количества информации в каналах, используемых для вычисления узкополосного индекса наличия нефти;
7. Определение количества информации в каналах, используемых для вычисления

широкополосного индекса аномальных тяжелых металлов;

8. Определение требований к отношению сигнал/шум в валидационном канале измерительной системы с учетом условия информационного баланса, т.е. равенства количества информации, извлекаемого при основных и валидационных измерениях. обеспечение в системе вычисленной величины ψ_0 отношения сигнал/шум путем фильтрации сигнала;

9. Формирования конечного суждения о наличии нефти на основе оценки степени корреляции узкополосных и широкополосных сигнатурных признаков определенных при вычисленной величине отношения сигнал/шум.

Блок-схема вышеизложенного алгоритма показана на рисунке 2.

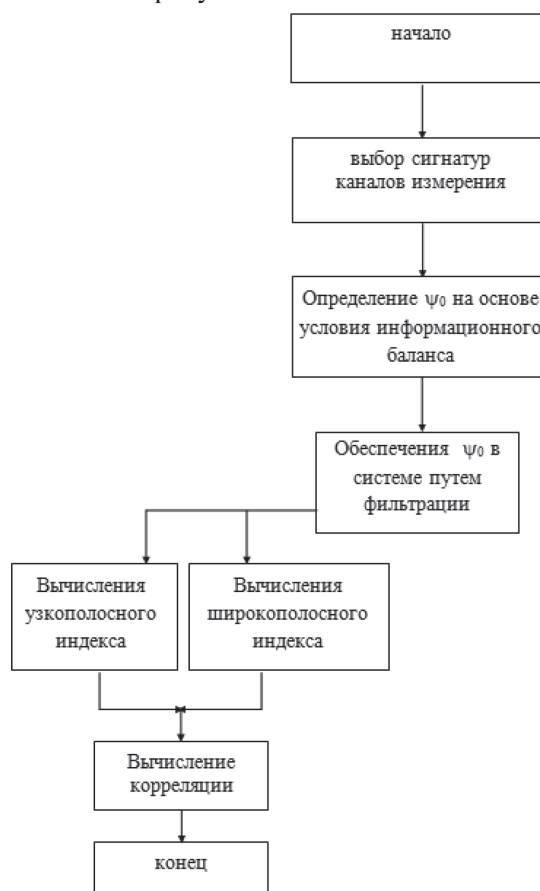
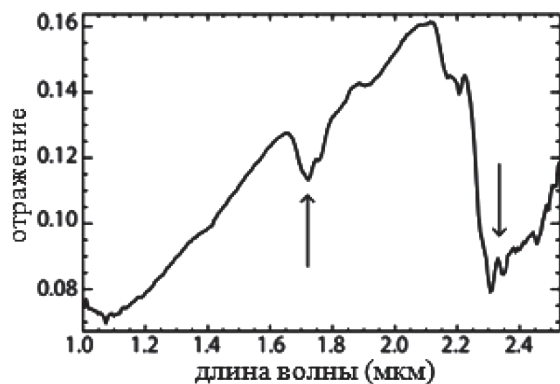


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма реализации предлагаемого метода

Вкратце рассмотрим основные узкополосные сигнатурные признаки наличия нефтяных углеводородов в почве из-за просачивания или другой причины возможного загрязнения. Согласно источникам [1–7], основные спектральные признаки наличия нефти в почве могут быть идентифицированы в отражательном

спектре загрязненной почвы на длинах волн: 2310–2350 и 1700–1750 нм (рисунок 3).



Стрелками показаны области спектрального поглощения битума в составе нефти [2]

Рисунок 3. Отражательный спектр нефтяного песка

Согласно [5], для обнаружения нефтяного загрязнения может быть использован следующий индекс HD, предложенный Шартом [6]:

$$HD = \frac{A + C}{2B}, \quad (1)$$

где A — сигнал на спектре отражения на длине волны 2297 нм;

B — на длине волны 2313;

C — на длине волны 2329.

При $HD > 1$ считается, что обнаружены нефтяные углеводороды.

Согласно [5], также весьма распространен индекс HI, предложенный Кюнь [7]:

$$HI = (\lambda_A - \lambda_B) \frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B, \quad (2)$$

где R_A, R_B, R_C — значения сигналов в спектре отражения на длинах волн $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$;

$\lambda_A = 1705$ нм;

$\lambda_B = 1729$ нм;

$\lambda_C = 1741$ нм (рисунок 4).

Несколько подробно рассмотрим возможности недисперсивного дистанционного зондирования используемого в предлагаемом методе в качестве методической основы проведения валидационных измерений результатов гиперспектрального обнаружения нефтяного загрязнения.

Согласно [8], в зонах нефтяного загрязнения почвы в регионе нефтяных месторождений в Техасе, а также на месторождении Bell Creek в почве обнаружено избыточное количество таких тяжелых металлов, как V, Cr, Mn, Ni, Co, Cu, U, Fe, Zn, Pb.

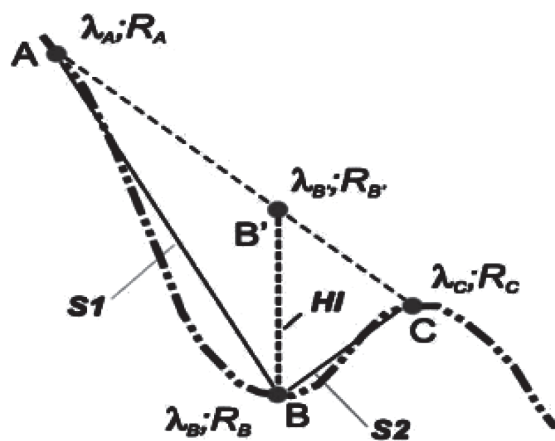


Рисунок 4. Графическая иллюстрация данных для вычисления индекса HI по спектру отражения почвы загрязненной нефтью

Указанный факт изложен во многих работах, например в [9, 10]. Спектральные области для недисперсивного дистанционного зондирования аномального скопления тяжелых металлов в основном определяются в двух вариантах: 1,0–2,5 мкм для Ni, Cr, Cd, As, Cd и 0,7–1,4 мкм для Hg [10].

Что касается гиперспектральной аппаратуры, пригодной для проведения вышеуказанных измерений, то здесь вполне применимы известные гиперспектрометры, предназначенные для установки на спутниках и самолетах. Основные показатели нескольких таких приборов приведены в таблице 1 [5].

Изложим математические основы предлагаемого метода информационного баланса. Примем, что измерения осуществляются гиперспектрометром с числом каналов, равном N_n . Допустим, что для измерения неинформативных опорных величин в спектре отражения расходуются N_0 каналов. При этом количество каналов, используемых для узкоспектральных измерений, необходимых для вычисления углеводородных индексов, равно N_d , следовательно, для проведения недисперсивных измерений используются $(N_{nl} - N_d)$ каналов, где $N_{nl} = N_n - N_0$.

Количество информации, извлекаемой в результате проведения дисперсивных измерений, определим как

$$M_d = N_d \log_2 \frac{U_d}{\sigma}, \quad (3)$$

где U_d — диапазон изменения измеряемого сигнала;

σ — шумы одного канала.

Количество информации, извлекаемой в результате недисперсивных измерений тяжелых металлов, определим как

Таблица 1. Основные показатели спутниковых и самолетных спектрометров

Сенсор Показатель	HYPERION	ALI	ASTER	LANDSAT	AVIRIS	HY MAP
Тип сенсора	Спутниковый гипер-спектрометр	Спутниковый мульти-спектрометр	Спутниковый мульти-спектрометр	Спутниковый мульти-спектрометр	Самолетный гипер-спектрометр	Самолетный гипер-спектрометр
Количество каналов	242	7	15	8	224	128
Каналы для «углеводородов»	155–160	5 7	4 8	5 7	142–147 204–205	83–87 111–113
Спектральное разрешение	426–2395 нм	433–2350 нм	500–2500 м	441–2345 м	380–2500 м	45–2500 нм
Пространственное разрешение	30 м	30 м	15 м, 30 м	30 м	20 м	8 м

$$M_{nd} = m \cdot \log_2 \left(\sqrt{\frac{N_{n1} - N_d}{m}} \right) \cdot \frac{U_d}{\sigma}, \quad (4)$$

где m — количество выходов или групп, в которые объединены каналы гиперспектрометра в количестве $\frac{N_{n1} - N_d}{m}$.

Основным положением метода информационного баланса является равенство количества информации, добываемой при проведении основных и валидационных гиперспектрометрических измерений. Это положение можно обосновать следующим образом.

1. Если $M_d > M_{nd}$, то получаем недостаточно подтвержденную измерительную информацию.

2. Если $M_{nd} > M_d$, то получаем нехватку подтвержденной измерительной информации и избыток валидационной информации.

Следовательно, с учетом (3) и (4) условие информационного баланса имеет вид

$$M_d = M_{nd} \quad (5)$$

или

$$N_d \log_2 \frac{U_d}{\sigma} = m \cdot \log_2 \left[\sqrt{\left(\frac{N_{n1} - N_d}{m} \right) \frac{U_d}{\sigma}} \right]. \quad (6)$$

Из выражения (6) получаем

$$\left(\frac{U_d}{\sigma} \right)^{N_d} = \left(\frac{N_{n1} - N_d}{m} \right)^{\frac{m}{2}} \left(\frac{U_d}{\sigma} \right)^m. \quad (7)$$

Из выражения (7) находим следующее выражение для требуемой величины отношения сигнал/шум ψ , при котором обеспечивается условие информационного баланса

$$\psi = \frac{U_d}{\sigma} = {}^{m-N_d} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{N_{n1} - N_d}{m} \right)^{\frac{m}{2}}}}. \quad (8)$$

Таким образом, показано, что для обнаружения нефтяного загрязнения почвы в регио-

нах нефтедобычи методом дистанционного зондирования на базе существующих спектральных индексов (сигнатур) высокая достоверность результатов может быть получена при должной организации валидационных измерений. Известный факт аккумуляции тяжелых металлов в зонах нефтедобычи позволяет использовать признак аномалии тяжелых металлов в качестве методической базы для организации валидационных измерений. При этом каналы валидационных измерений, объединенные в группах в количестве m , позволяют проводить недисперсивные валидационные измерения с высокой достоверностью за счет суммирования сигналов в группе. При этом требование равенства информации в каналах, используемых для формирования узкоспектральных и широкополосных спектральных признаков нефти и тяжелых металлов соответственно, позволяет сформировать требования к отношению сигнал/шум в системе для дальнейшего вычисления степени корреляции между вычисленными индексами.

Выводы

1. Для обнаружения зон нефтяного загрязнения в прибрежных зонах с применением бортовых гиперспектрометров предложен метод информационного баланса сигналов дисперсивного и недисперсивного зондирования, используемых соответственно для основных и валидационных измерений. Изложен операционный алгоритм предлагаемого метода.

2. Дано математическое обоснование предлагаемого метода.

3. На основе условия информационного баланса получено выражение для определения отношения сигнал/шум в системе для дальнейшего вычисления корреляции между узкополосным нефтяным индексом и широкополосным сигнатурным признаком аномальной концентрации тяжелых металлов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ben Lord. Remote Sensing Techniques for Onshore Oil and Gas Explore // *The Leading Edge*. 2017. pp. 24–31. <http://dx.doi.org/10.1190/tle36010024.1>.
2. Michelle Alexandra Speta. Hyper Spectral Imaging for the Characterization of Athabasca Oil Sands Core: Doc. Phil. Sci. Diss. Canada, Department of Earth and Atmospheric Sciences University of Alberta, 2016. 134 p.
3. Ramakrishna D., Rishikesh Bharti. Hyper Spectral Remote Sensing and Geological Applications // *Current Science*. 2015. Vol. 108. No. 5. pp. 879–889.
4. James M. Ellis, Hattie H. Davis, Michael B. Quinn. *Airborne Hyperspectral Imagery for the Petroleum Industry* // The Mapfactory, 2002.
- Eva Smejkalova, Petr Bujok, Miroslav Píkl. Study of Old Ecological Hazards, Oil Seeps and Contaminations Using Earth Observation Methods-Spectral Library for Oil Seep // *Archives of Environmental Protection*. Vol. 43. No. 1. pp. 3–10. doi:10.1515/aep-2017-0001.
5. Short N. Finding Oil and Gas in Oklahoma. URL: http://fas.org/irp/imint/does/rst/sect5/sect5_5.html (дара об-ращения 01.08.2014).
- Kühn F., Oppermann K., Hörig B. Hydrocarbon Index — an Algorithm for Hyper Spectral of Hydrocarbons // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25. No. 12. pp. 2467–2473.
- Schumacher D. Hydrocarbon — Induced Alternation of Soils and Sediments, in D. Schumacher and M.A. Abrams, eds // *Hydrocarbon Migration and Its Near-Surface Expression: AAPG Memoir 66*, pp. 71–89.
- Gabriel Olulakin Adesina, Kasali Amofe Adelasoye. Effect of Crude Oil Pollution on Heavy Metal Contents, Microbial Population in Soil, and Maize and Cowpea Growth // *Agricultural Sciences*. 2014. Vol. 5. No. 1. pp. 43–50. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.51004>.
- Paresh H. Rathod, David G. Rossiter, Marleen F. Noomen, Freek D. van der Meer. Proximal Spectral Sensing to Monitor Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils // *International Journal of Phytoremediation*. 2013. No. 15. pp. 405–426.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Асадов Хикмет Гамид оглы, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика

Hikmat H. Asadov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department, Research Institute of Aerospace Informatics, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

Рагимов Рауф Махмуд оглу, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по науке НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика

Rauf M. Rahimov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science, Research Institute of Aerospace Informatics, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

Абдуллаева Латифа Джафарага гызы, ведущий научный сотрудник НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика

Latifa D. Abdullayeva, Leading Researcher, Research Institute of Aerospace Informatics, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

REFERENCES

1. Ben Lord. Remote Sensing Techniques for Onshore Oil and Gas Explore. *The Leading Edge*, 2017, pp. 24–31. <http://dx.doi.org/10.1190/tle36010024.1>.
2. Michelle Alexandra Speta. *Hyper Spectral Imaging for the Characterization of Athabasca Oil Sands Core*: Doc. Phil. Sci. Diss. Canada, Department of Earth and Atmospheric Sciences University of Alberta, 2016. 134 p.
3. Ramakrishna D., Rishikesh Bharti. Hyper Spectral Remote Sensing and Geological Applications. *Current Science*, 2015, Vol. 108, No. 5, pp. 879–889.
4. James M. Ellis, Hattie H. Davis, Michael B. Quinn. *Airborne Hyperspectral Imagery for the Petroleum Industry*. The Mapfactory, 2002.
5. Eva Smejkalova, Petr Bujok, Miroslav Píkl. Study of Old Ecological Hazards, Oil Seeps and Contaminations Using Earth Observation Methods-Spectral Library for Oil Seep. *Archives of Environmental Protection*, Vol. 43, No. 1, pp. 3–10. doi:10.1515/aep-2017-0001.
6. Short N. *Finding Oil and Gas in Oklahoma*. Available at: http://fas.org/irp/imint/does/rst/sect5/sect5_5.html (accessed 01.08.2014).
7. Kühn F., Oppermann K. and Hörig B. Hydrocarbon Index — an Algorithm for Hyper Spectral of Hydrocarbons. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, No. 12, pp. 2467–2473.
8. Schumacher D. Hydrocarbon — Induced Alternation of Soils and Sediments, in D. Schumacher and M.A. Abrams, eds. *Hydrocarbon Migration and Its Near-Surface Expression: AAPG Memoir 66*, pp. 71–89.
9. Gabriel Olulakin Adesina, Kasali Amofe Adelasoye. Effect of Crude Oil Pollution on Heavy Metal Contents, Microbial Population in Soil, and Maize and Cowpea Growth. *Agricultural Sciences*, 2014, Vol. 5, No. 1, pp. 43–50. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.51004>.
10. Paresh H. Rathod, David G. Rossiter, Marleen F. Noomen, Freek D. van der Meer. Proximal Spectral Sensing to Monitor Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, No. 15, pp. 405–426.