

УДК 553.981:528.8(535.33:581.45)(477.75)

Применение адаптивных спектральных индексов для поиска залежей углеводородов с использованием материалов космической съемки и наземного фотометрирования

В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порушкевич *

ГУ "Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины", Киев, Украина

Получена сравнительная характеристика информативных значений длин волн адаптивного спектрального индекса (АСИ) растительности по космическим снимкам и наземным данным, исходя из условия максимального расстояния между средними значениями индексов для точек на участках, газопродуктивность которых подтверждена бурением, и на участках без залежей углеводородов. АСИ получены для поля пшеницы над Глебовским газовым месторождением (Крым, Украина) и вне месторождения по данным космического снимка Landsat 7 от 06 июня 2010 г. и результатам наземного спектрометрирования 28 мая 2010 г.

Ключевые слова: залежи углеводородов, адаптивный спектральный индекс растительности, спектрорадиометр FieldSpec 3 FR, Landsat 7, Глебовское газовое месторождение

© В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порушкевич. 2016

1. Введение

Повышение результативности геологоразведочных газопоисковых работ может быть осуществлено путем внедрения современных космических технологий, что позволит с минимальными затратами уточнять и получать новые данные об особенностях геологического строения площадей и локализовать газоперспективные площади. В предлагаемом методе анализируется комплекс материалов космических снимков (КС) и съемки гиперспектральным спектрорадиометром (ГС) для решения геологических задач. Выбор наиболее информативных признаков для района поиска производится для наземных мультиспектральных съемок и космических снимков путем сравнительного анализа цифровых моделей, получаемых из данных ГС и КС.

2. Проблема

Главными факторами, влияющими на спектральные характеристики растений, являются пигментация, особенности внутреннего строения листьев, общее содержание влаги. В синей и красной зоне спектра отражательная способность растений очень низкая, в зеленой зоне энергии отражается больше, а в ближнем инфракрасном диапазоне наблюдаются максимальные значения коэффициентов отражения для растительности. Обусловлены они особенностями внутреннего строения листьев и связанными с ним очень высокой пропускной и отражательной способностью, при очень низком поглощении энергии. В среднем инфракрасном

диапазоне сильное влияние на форму спектральной кривой оказывают полосы поглощения воды в длинах волн 1.4, 1.9 и 2.7 мкм. Большая часть падающей энергии поглощается водой, имеющейся в листе, а остальная ее часть отражается.

Влияние залежей углеводородов на спектральные характеристики растений рассматривается во многих работах. Результаты спектрометрирования пшеницы над Глебовским газовым месторождением (Крым, Украина), где значительные объемы миграции углеводородов из месторождений нефти и газа наблюдаются в зонах разломов, получены дистанционно портативным спектрорадиометром FieldSpec® 3 FR в солнечную погоду 28 мая 2010 г. [3]. Установлено, что в местах аномально высоких концентраций газообразных углеводородов в грунте значения вегетационных индексов положения красного края (Red-edge Position — REP) и мерисовского наземного хлорофиллового индекса (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index — MTCI) уменьшаются по сравнению с их значениями для фонового участка за пределами месторождения. Это может позволить использование при поиске газа данных сенсоров, которые имеют в зоне красного края необходимые 3 канала и соответствующее пространственное разрешение, как например RapidEye (MSI Multi Spectral Imager DLR Waveband: 4 VIS + 1 NIR band: 440–510 nm, 520–590 nm, 630–685 nm, 690–730 nm, 760–850 nm Spatial resolution: 6.5 m).

При гиперспектральной съемке спектрорадиометром FieldSpec® 3 FR формируются значения в диапазоне 350–2500 нм в спектральных зонах величиной 1 нм. Гиперспектральная космическая информация требует новых подходов к анализу данных, так для дешифрирования применяется спект-

* E-mail: a.porushkevych@ujrs.org.ua

ральная функции сдвига по длине волны электромагнитного излучения, как интегральный показатель спектральных характеристик элементов ландшафтов [2]. Значение угла наклона спектральной функции сдвига возрастает с увеличением доли растительности на снимке и уменьшением участков без растительности (грунт, дороги, крыши и т. д.).

3. Возможности

Предлагается информативные спектральные характеристики газовых месторождений вырабатывать на основе спектрального индекса (СИ) — показателя, рассчитываемого в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) данных наземного и дистанционного зондирования. В настоящее время существует множество вариантов спектральных индексов. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв.

При обработке космических снимков в программном комплексе ENVI имеется специальный калькулятор спектральных вегетационных индексов ENVI, который позволяет рассчитать 27 вегетационных индексов, используемых для оценки состояния растительности, содержания пигментов, азота, углерода, воды [6]. При работе с гиперспектральным снимком может быть выполнен расчет всех 27 индексов. Это рассчитываемые в разных спектральных зонах индексы — “зелености”, эффективности использования света, содержания углерода в виде лигнина и целлюлозы и др.

Известно, что эмпирические спектральные индексы по гиперспектральным спутниковым данным были использованы для построения карт хвойных, принадлежащих семейству кипарисовых в Кордильерах Южной Америки [7], а решение задачи классификации покрытий ландшафта по многоспектральным аэрокосмическим изображениям выполняется путем оптимизации состава индексов, обеспечивающего максимальную разделимость классов с использованием дивергенции Кульбака–Лейблера [4].

4. Проведение измерений и анализ данных спектрометрирования

Спектрометрирование пшеницы над Глебовским газовым месторождением проводилось дистанционно в солнечную погоду 28 мая 2010 года портативным спектрометрическим прибором FieldSpec® 3 FR. Схему маршрута наземной спектрометрической съемки с номерами точек, в которых осуществлялось измерение спектров отражения озимой пшеницы, приведено на рис. 1, где на фоновом участке за границами месторождения находятся точки 95–105 и над месторождением — точки 106–116.

5. Модель

Адаптивный спектральный индекс (Adaptive Spectral Index — ASI) может определяться по оптимальным длинам волн, которые получаются исходя из условия максимального модуля разности между значениями индексов для эталонных точек на участках, газопроодуктивность которых

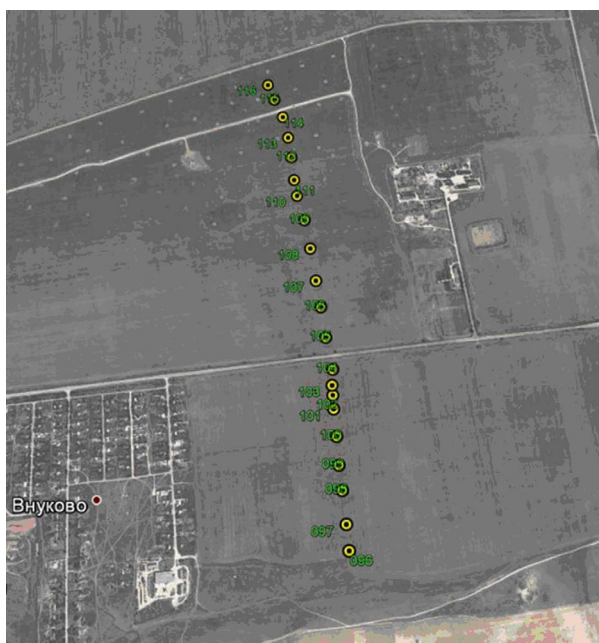


Рис. 1. Схема маршрута проведения спектрометрической съемки на Глебовском газовом месторождении 28 мая 2010 г. (22 точки с номерами 95–116)

подтверждается бурением (сигнал) $ASI(s_i)$ и для участков без залежей углеводородов (фон) $ASI(f_j)$ [2].

В данной работе алгоритм построен на оценке вдоль маршрута расстояния между средними значениями СИ области месторождения и фоновой области с учетом их среднеквадратических отклонений. Определение оптимальных длин волн λ_p и λ_q ($p = 1, 2, \dots, P-1, q = 1, 2, \dots, P$), где P — количество спектральных каналов, производится по представленному далее алгоритму.

Для спектров области месторождения и фоновой области ASI определяется в соответствии с выражением

$$ASI = \frac{L(\lambda_p) - L(\lambda_q)}{L(\lambda_p) + L(\lambda_q)}, \quad (1)$$

где $p = 1, 2, \dots, P-1, q = 1, 2, \dots, P$.

На основе средних значений СИ для области месторождения $ASI(S)$ и вне месторождения $ASI(F)$ для множества N упорядоченных пар значений λ_p и λ_q отсчетов составляем декартово произведение N^2 и вычисляем значения

$$M_n = \frac{|\Delta ASI| - \sigma[ASI(S)] - \sigma[ASI(F)]}{|\Delta ASI|}. \quad (2)$$

Из полученных значений M_n выбираем наибольшие, пары длин волн которых используются при вычислении значений ASI для каждой точки маршрута.

6. Эксперимент

В ходе эксперимента из спектрограмм, полученных спектрометрией FieldSpec® 3 FR, моделируются спектральные каналы Landsat 7 в соответствии с приведенной таблицей.

Для модели Landsat 7, построенной по данным спектрометра FieldSpec® 3 FR, определены значения M_n в соответствии с выражениями (1), (2), которые с указанием каналов Landsat 7 представлены на рис. 2. Также для снимка Landsat 7 от 6 июня 2010 г. были получены значения M_n , которые представлены на рис. 3. В полученных результатах введены обозначения B_p и B_q , соответствующие обозначениям спектральных каналов Landsat 7.

Пороговое значение для разделения классов сигнала и фона выбирается в виде среднего значения по всей выборке и допускается, что две выборки ASI

(s_i) и $ASI(f_j)$ объемами $i = 1, 2, \dots, I$ и $j = 1, 2, \dots, J$ являются нормально распределенными случайными величинами. По выборочным данным проверяется нулевая гипотеза о равенстве математических ожиданий этих случайных величин $ASI(S)$ и $ASI(F)$. Если нулевая гипотеза выполнена, т. е. $ASI(S) - ASI(F) = 0$, тогда, исходя из независимости выборок, оценка дисперсии разности выборочных средних равна $D = \frac{D_S^2}{I} + \frac{D_F^2}{J}$. Следовательно, t — статистика для проверки нулевой гипотезы равна

$$t = \frac{|ASI(S) - ASI(F)|}{\sqrt{\frac{D_S^2}{I} + \frac{D_F^2}{J}}}.$$

После того как t рассчитано, его необходимо сравнить с коэффициентом Стьюдента, найденным в табл. [1].

При сравнении критерия достоверности разности двух средних арифметических с коэффициентом Стьюдента возможны два случая:

- $t \geq t_T$. Разность двух сравниваемых средних арифметических достоверна, т. е. с точки зрения математической статистики они отличаются друг от друга с выбранной доверительной вероятностью.
- $t \leq t_T$. Разность двух сравниваемых средних арифметических недостоверна, т. е. нельзя сказать, что одно среднее арифметическое больше или меньше второго.

В результате проверки гипотезы установлено, что разность двух сравниваемых средних арифметических достоверна для модели Landsat 7 для всех ASI , за исключением двух наименьших M_n (рис. 2) $ASI(B1, B3)$ и $ASI(B2, B7)$. Для снимка Landsat 7 — достоверна для всех ASI , за исключением трех наименьших M_n (рис. 3) $ASI(B3, B7)$, $ASI(B2, B3)$ и $ASI(B1, B4)$.

Как пример, для всей трассы точек (95–116) для модели Landsat 7 (по данным FieldSpec® 3 FR) показаны значения спектральных индексов $FS14$ и $FS47$, которые представлены на рис. 4, а для снимка Landsat 7 — значения $LS47$ и $LS25$, которые представлены на рис. 5, ($n = 95, 96, \dots, 116$ — номер точки). Представляет интерес посмотреть значения спектральных индексов каналов, соответствующих индексу $NDVI$ (0.63–0.69 $мкм$) и (0.75–0.90 $мкм$), значения которого приведены на рис. 6.

Таблица

Спектральные каналы Landsat 7 [8]

№ канала	Band 1 (B1)	Band 2 (B2)	Band 3 (B3)	Band 4 (B4)	Band 5 (B5)	Band 6 (B6)	Band 7 (B7)
Спектральный диапазон, $мкм$	0.45–0.515	0.525–0.605	0.63–0.69	0.75–0.90	1.55–1.75	10.40–12.5	2.09–2.35

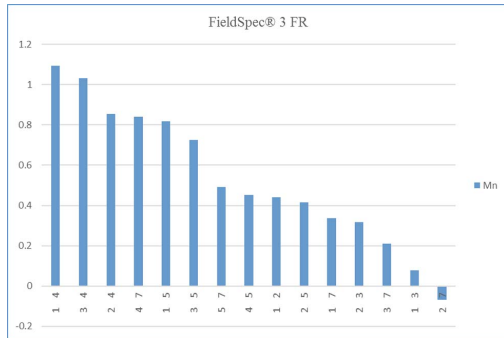


Рис. 2. Значения M_n для модели Landsat 7 по данным спектрорадиометра FieldSpec® 3 FR, где значения B_p и B_q указаны в таблице

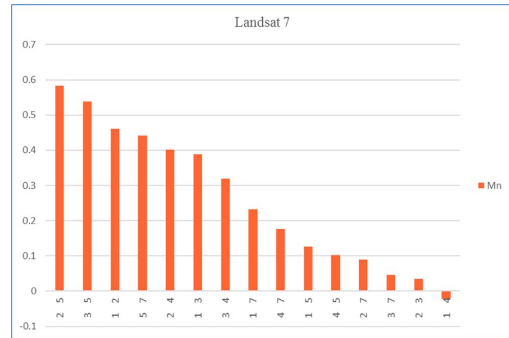


Рис. 3. Значения M_n по данным Landsat 7, где значения B_p и B_q указаны в таблице

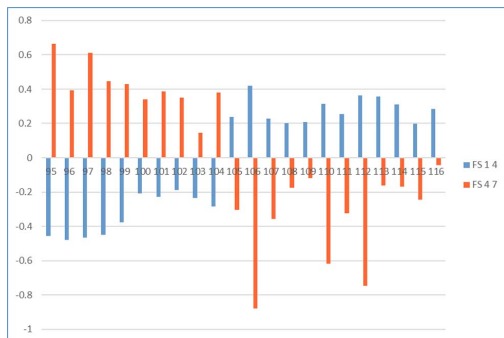


Рис. 4. Значения ASI вдоль трассы по данным спектрорадиометра FieldSpec® 3 FR, где обозначено FS 1 4 есть спектральный индекс $ASI (B1, B4)$ и FS 4 7— $ASI (B4, B7)$

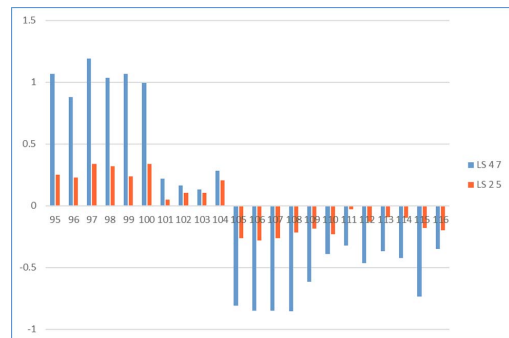


Рис. 5. Значения ASI вдоль трассы по данным снимка Landsat 7, где обозначено LS 4 7 есть спектральный индекс $ASI (B4, B7)$ и LS 2 5— $ASI (B2, B5)$

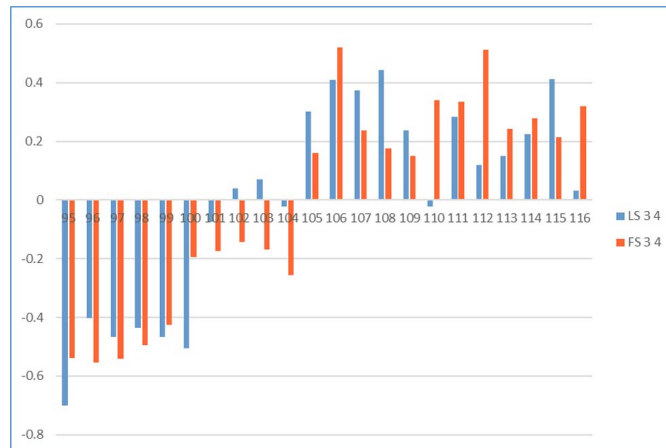


Рис. 6. Значения ASI для пар каналов, соответствующих индексу $NDVI$, где обозначено LS 3 4 есть спектральный индекс $ASI (B3, B4)$ по данным снимка Landsat 7 и FS 3 4— $ASI (B3, B4)$ по данным спектрорадиометра FieldSpec® 3 FR

Выводы

По данным, представленным на рис. 4 и рис. 5 видно, что для участков с месторождением и без месторождения выполнена правильная классификация для Landsat 7 и FieldSpec® 3 FR. Однако расстояние от порогового значения для данных FieldSpec® 3 FR меньше изменяется по множеству точек (FS 1 4, что соответствует спектральным интервалам 0.45–0.515 мкм и 0.75–0.90 мкм). Для дан-

ных снимка Landsat 7 (LS 4 7, что соответствует спектральным интервалам 0.75–0.90 мкм и 2.09–2.35 мкм) наряду с точками со значительным превышением порога есть точки близкие к пороговым значениям. По результатам на рис. 6, соответствующих индексу $NDVI$ (0.63–0.69 мкм) и (0.75–0.90 мкм), для модели по данным FieldSpec® 3 FR выполнена правильная классификация, а для данных Landsat 7 имеем неправильные решения для нескольких точек маршрута.

7. Заключение

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования адаптивных спектральных индексов для поиска залежей углеводородов по данным наземных спектрограмм и космических снимков. Нужно отметить, что для данных FieldSpec® 3 FR наиболее часто встречается канал Band 4 (0.75–0.90 мкм), а для Landsat 7 — Band 5 (1.55–1.75 мкм). Результаты получены для поля пшеницы над Глебовским газовым месторождением и для обобщения метода необходимы исследования на других месторождениях и растениях.

Литература

1. Большев Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
2. Дешифрування гіперспектральної космічної інформації на основі текстурних і спектральних характеристик досліджуваних об'єктів / В. Г. Якимчук [та ін.] // Доповіді Національної академії наук. — 2008. — № 2. — С. 129–134.
3. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем / В. І. Лялько [та ін.] // Космічна наука і технологія. — 2010. — Т. 6. — № 6. — С. 5–10.
4. Использование полного набора нормализованных межканальных индексов многоспектральных космических изображений при классификации покрытий ландшафта. / М. А. Попов [та ін.] // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. — 2007. — Т. 20 (59). — № 1. — С. 175–182.
5. Застосування спектральних індексів спектрограм листя дерев для оцінки екологічних умов їхнього росту в м. Києві [Електронний ресурс] / В. Г. Якимчук, Л. П. Ліщенко, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порущкевич // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2015. — № 5. — С. 4–14. — Режим доступу до журналу: <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/index> (2015). — Назва з екрану.
6. Exelis. ENVI Tutorial: Vegetation Analysis [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Vegetation_Analysis.pdf. — Назва з екрану.
7. Peca Marco A. Constructing satellite-derived hyperspectral indices sensitive to canopy structure variables of a Cordilleran Cypress (*Austrocedrus chilensis*) forest. / Marco A. Peca, Alexander Brenning, Ariel Sagredo // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2012. — № 74. — Р. 1–10.
8. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Landsat 7 Science Data Users Handbook [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf. — Назва з екрану.

ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ПОШУКУ ПОКЛАДІВ ВУГЛЕВОДНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ І НАЗЕМНОГО ФОТОМЕТРУВАННЯ

В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порущкевич

Отримано порівняльну характеристику інформаційних значень довжин хвиль адаптивного спектрального індексу (*ACI*) рослинності за космічними знімками та наземним даними, виходячи з умови максимальної відстані між середніми значеннями індексів для точок на ділянках, газонасність яких підтверджена бурінням, і на ділянках без покладів вуглеводнів. *ACI* отримані для поля пшениці над Глібовським газовим родовищем (Крим, Україна) і поза родовищем за даними космічного знімка Landsat 7 від 6 червня 2010 року і результатами наземного спектрометрування 28 травня 2010 року.

Ключові слова: поклади вуглеводнів, адаптивний спектральний індекс рослинності, спектрорадіометр FieldSpec 3 FR, Landsat 7, Глібовське газове родовище

THE USE OF THE ADAPTIVE SPECTRAL INDEXES FOR THE HYDROCARBON DEPOSITS EXPLORATION USING REMOTELY SENSED DATA AND GROUND-BASED PHOTOMETRY

V. H. Yakymchuk, K. Yu. Sukhanov, A. Yu. Porushkevych

The comparative characteristics of the informative values of the wavelengths of the adaptive spectral index (*ASI*) of vegetation using remotely sensed data and in-situ measurements, based on the condition of the maximum distance between the average values for the indexes on the points where the gas availability has been confirmed by drilling and on areas without hydrocarbon deposits were obtained. *ASI* was obtained for the wheat fields over Hlibovskiy gas field (Crimea, Ukraine) and out the deposit using data from Landsat 7, dated 06 June 2010 and the results of in-situ spectrometry dated May 28, 2010.

Keywords: hydrocarbon deposits, adaptive spectral index, FieldSpec 3 FR, Landsat 7, Hlibovskiy gas field