

В. Г. Якимчук, Е. И. Левчик, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порушкевич,
член-корреспондент НАН Украины **А. Д. Федоровский**

Определение информативных признаков в спектрах отражения и индуцированной лазером флуоресценции растительного покрова для аэрокосмического зондирования земной поверхности

По наземным измерениям спектров отражения и флуоресценции листьев березы были определены информативные признаки разделения классов нефтегазоносных участков и территорий, на которых отсутствуют месторождения. В качестве информативного признака применена коррелограмма спектрограммы, рассматриваемой как реализация процесса вдоль оси длины волны электромагнитного излучения. Приведены требования к космической информации и выработаны рекомендации для выбора информативных спектральных параметров аппаратуры аэрокосмического зондирования земной поверхности при решении задач природопользования.

Для решения задач природопользования на основе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходимо располагать информативными признаками исследуемых явлений, процессов и объектов, которые дешифрируются на космических снимках. Спектральные характеристики объектов аэрокосмического зондирования, моделирование объектов и новые методики в решении задач природопользования представлены в публикации [1]. Вопросы формализованного сопоставления различных вариантов космической аппаратуры ДЗЗ и оценки эффективности решения задач ДЗЗ в единой критериальной шкале рассмотрены в статье [2]. Новый способ выбора оптимальной комбинации спектральных изображений, учитывающий не только статистические распределения признаков объектов разных классов на спектральных изображениях, но и пространственно-статистические свойства изображения предложен в [3]. Подход к оптимизации результатов наземного спектрометрирования растительности для достижения наилучшей статистической делимости сегментов, которые соответствуют аномалии и фону, демонстрирует работа [4].

Анализ гиперспектральной космической информации на основе спектральных характеристик исследуемых объектов рассматривается в работе [5], в которой применяется спектральная функция сдвига (СФС) по длине волны электромагнитного излучения как интегральный показатель спектральных характеристик элементов урболандшафтов. Ранее было показано [6], что для сосны и березы, произрастающих на Новотроицком и Восточно-Рогинцевском месторождениях Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ), изменение физиологического состояния растений и их флуоресцентных характеристик связано с флюидогеодинамическими процессами в пределах зон трещиноватости и месторождений углеводородов.

В качестве примера при выявлении информативных признаков в спектрах растительного покрова нами исследовались изменения в спектрах отражения и флуоресценции растительности в зависимости от ее физиологического состояния при наличии нефтидогенных процессов. Для этого был выбран участок Восточно-Рогинцевского нефтяного месторожде-

ния ДДВ. Растительным объектом служили листья березы бородавчатой (*Betula verrucosa*), повсеместно распространенной в зоне исследований.

На участке с однородной растительностью была проложена трасса, вдоль которой в 35 ее точках (10 первых — на нефтегазоносных участках) для листьев березы записывали спектры флуоресценции (СФ), индуцированные лазером, и спектры отражения в диапазоне от 400 до 750 нм. Для регистрации СФ использовали спектральный комплекс КСВУ-23, модифицированный для работы с импульсными сигналами при возбуждении их облучением импульсного азотного лазера ЛГИ-21 с длиной волны 337,1 нм и мощностью в импульсе 48 кВт. Спекрофотометрирование листьев выполнялось спектрофотометром СФ-18.

Для обоих видов спектров были выявлены информативные признаки, алгоритмы получения которых представлены ниже.

1. Анализируемые спектры излучения флуоресценции заданы конечным набором вещественных значений $f_m = f(\lambda_m)$ на равномерной сетке $\lambda_m = \Delta\lambda \cdot m$, $m = 0, 1, \dots, M - 1$, где постоянная величина $\Delta\lambda$ является шагом выборки. В k -й точке ($k = 0, 1, \dots, K$) имеем три измерения: $f_m^{k1}, f_m^{k2}, f_m^{k3}$.

Для получения признаков исследовали взаимосвязь нескольких измерений спектрограмм в каждой из точек измерения СФ. С целью учета этой взаимосвязи в разных диапазонах спектра применялась матрица выборочных коэффициентов парной корреляции Q , используемая обычно в многомерной модели корреляционного анализа для вычисления частных и множественных коэффициентов корреляции [7]. Матрица применялась для трех измерений спектральной функции в k -й точке окном по N отсчетов и шагом L отсчетов:

$$Q_{NL}^k(m) = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где r_{12}, r_{13}, \dots — коэффициенты корреляции между f_m^{k1} и f_m^{k2} , f_m^{k1} и f_m^{k3}, \dots

Окно является скользящим, вследствие чего получается последовательность значений $Q_{NL}^k(m)$ как функция аргумента m вдоль оси λ .

Значения определителя $D_{NL}^k(m)$ матрицы $Q_{NL}^k(m)$ для k -й точки дают дискретные значения с шагом L отсчетов. Если построить такие функции для всех точек измерений, то получим семейство кривых, которое можно представить графически в координатах длин волн λ номеров точки K (рис. 1).

Оптимальной для выделения участков с месторождением углеводородов и без месторождений оказалась синяя область спектра с максимумом $\lambda = 448$ нм, что легко просматривается на графике значений определителя $D_{NL}^k(m)$ (см. рис. 1).

2. По спектрам отражения листьев березы также были определены информативные признаки разделения классов нефтегазоносных участков и территории, на которой отсутствуют месторождения, принятой за фон.

Если рассматривать спектрограмму как реализацию процесса с неизвестными характеристиками вдоль оси длины волны электромагнитного излучения, целесообразно применить коррелограмму, которая в практическом анализе из-за неполноты имеющейся информации используется вместо строгой характеристики — корреляционной функции. Анализируемая спектрограмма $\Phi(\lambda)$ задана конечным набором вещественных значений $\Phi_m = \Phi(\lambda_m)$ на равномерной сетке $\lambda_m = \Delta\lambda \cdot m$, $m = 0, 1, \dots, M - 1$.

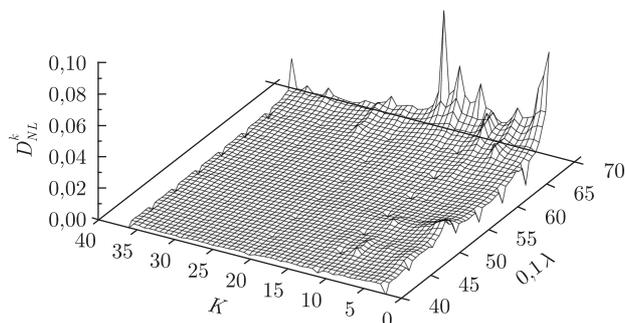


Рис. 1. График значений определителя D_{NL}^k при $N = 128$, $L = 16$ как функция зависимости по длине волны и номеру точки измерений K

Коррелограмма R_n ($n = 0, 1, \dots, N$) этой последовательности определяется в соответствии с выражением [8]:

$$R_n \equiv R(\Delta\lambda \cdot n) = \frac{1}{M - N} \sum_{m=0}^{M-1-N} \Phi_m \cdot \Phi_{m+n}. \quad (2)$$

Функцию $R(\Delta\lambda \cdot n)$ будем называть СФС.

Коррелограммы были вычислены для спектрограмм на нефтегазоносных участках и на территориях без залежей углеводородов, на первых — они обозначены R_n^S , на вторых — R_n^F . Введем пороговую коррелограмму R_n^P в соответствии с выражением

$$R_n^P = \frac{1}{2}(R_n^S + R_n^F). \quad (3)$$

Для оценки принадлежности коррелограммы к нефтегазоносному участку определяли суммарное отклонение анализируемой коррелограммы от пороговой:

$$G = \sum_{n=0}^N (R_n - R_n^P). \quad (4)$$

Классификация производится по правилу: если $S < 0$, то участок нефтегазоносный, если $S \geq 0$, то без углеводородов.

Метод классификации был проверен также на спектрограммах, снятых на участке Восточно-Рогинцевского нефтяного месторождения ДДВ (рис. 2). Таким образом, СФС может быть использована в качестве информативного признака нефтегазоносности.

После установления в спектрах растительности, полученных наземным спектрометрированием, информативных признаков разделения классов следующей задачей будет определение характеристик (спектрального и пространственного разрешения) космического сканера, по информации с которого можно вычислить СФС.

Минимальное спектральное разрешение сканера, при котором СФС еще может быть использована для классификации, определяется моделированием снижения спектрального разрешения путем сглаживания спектрограмм скользящими окнами величиной от 4 до 16 нм. В результате установлено, что при спектральном разрешении 10 нм сохраняется работоспособность алгоритма (4). Кроме того, была сделана оценка эффективности алгоритма при наличии шумов — присутствия в изображениях высокого спектрального разрешения

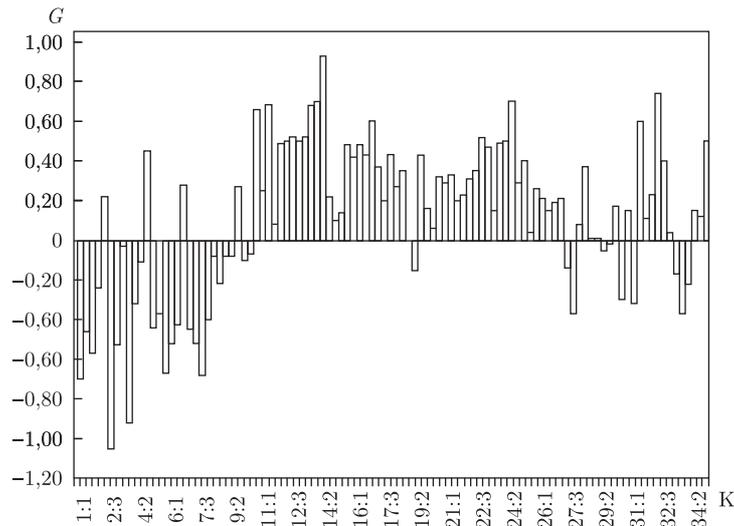


Рис. 2. Результаты классификации на нефтегазоносность. Ниже нулевого уровня обозначены нефтегазоносные участки, выше — фоновые

березовых массивов неоднородной растительности. Для этого применялась смесь исходных спектрограмм березы и травяного покрова [9]. Нами установлено, что при уменьшении доли берез до 70% и увеличении травы до 30% качество классификации по спектральной функции сдвига снижается на 13%.

В результате проведенных исследований СФ и спектрограмм отражения листьев березы, полученных при наземных измерениях, были определены спектральные информативные признаки наличия углеводов на ряде участков территории с березовыми массивами. Исходя из указанных признаков определены требования к космической информации и выработаны рекомендации для выбора информативных спектральных параметров при проведении аэрокосмического зондирования земной поверхности в интересах решения задач природопользования.

1. *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування* // За ред. В. І. Лялько, М. О. Попова. – Київ: Наук. думка, 2006. – 360 с.
2. *Боднар Е. Н., Якимчук В. Г., Федоровський А. Д.* Оценка и выбор варианта космической системы ДЗЗ на основе метода анализа иерархий // Доп. НАН України. – 2005. – № 8. – С. 106–111.
3. *Попов М. А., Станкевич С. А.* Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 1. – Вып. 3. – Москва: Ин-т косм. исследований РАН, 2006. – С. 106–112.
4. *Станкевич С. А., Титаренко О. В.* Оптимізація даних наземного спектрометрування при картуванні меж фітоіндикаційних аномалій // Наук. вісн. Нац. аграр. ун-ту України. – 2008. – Вип. 128. – С. 312–319.
5. *Якимчук В. Г., Суханов К. Ю., Козлов З. В., Ліценко Л. П.* Дешифрування гіперспектральної космічної інформації на основі текстурних і спектральних характеристик досліджуваних об'єктів // Доп. НАН України. – 2008. – № 2. – С. 129–134.
6. *Левчик Е. И., Товстюк З. М.* О возможной связи флуоресцентных параметров растительности с флюидогеохимическими процессами (на примере Ново-Троицкого месторождения углеводородов: Сб. науч. тр. – Днепропетровск: Нац. горн. академия Украины, 2000. – Т. 1, № 9. – С. 74–78.
7. *Кендал М., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. – Москва: Наука, 1976. – 736 с.

8. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Архипов А. И. и др. Прогнозирование и поиск месторождений нефти и газа на основе спектрофотометрирования растительного покрова // Геоинформатика. – 2010. – № 3. – С. 44–47.
9. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/>.

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

Поступило в редакцию 14.07.2011

В. Г. Якимчук, О. І. Левчик, К. Ю. Суханов, А. Ю. Поружкевич,
член-корреспондент НАН України **О. Д. Федоровський**

**Визначення інформативних ознак у спектрах відбиття
та індукованої лазером флуоресценції рослинного покриву
для аерокосмічного зондування земної поверхні**

За наземними вимірами спектрів відбиття і флуоресценції листя берези було визначено спектральні інформативні ознаки поділу класів нафтогазоносних ділянок і територій, на яких відсутні родовища. За інформативну ознаку застосовано корелограму спектрограми, як реалізації процесу вздовж осі довжини хвилі електромагнітного випромінювання. Визначено також вимоги до космічної інформації та розроблено рекомендації для вибору інформативних спектральних параметрів апаратури аерокосмічного зондування земної поверхні при роз'язанні задач природокористування.

V. G. Yakimtchuk, E. I. Levchik, K. Yu. Sukhanov, A. Yu. Porushkevich,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. D. Fedorovsky**

**Determination of the informative features in the reflection spectra and
laser-induced fluorescence of the vegetation for the aerospace sensing of
Earth's surface**

Informative features for the class separation of oil and gas sites and areas, where there are no deposits, are defined using the ground measurements of the reflection spectra and fluorescence of birch leaves. The correlogram spectrogram, regarded as a realization of the process along the wavelength axis of electromagnetic radiation, is used as the informative feature. The requirements for space-based information and the recommendations for the selection of informative spectral parameters of the aerospace sensing equipment are determined for solving the environmental problems.