

УДК 528.8.04:551.4

## Дешифрирование космических снимков: распознавание ландшафтных зон на основе структурного анализа

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук, Р. И. Новиков,  
И. П. Пахомов, К. Ю. Суханов, А. А. Терemenko

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшла до редакції 23.05.00

Розглянуті засоби дешифрування космічних знімків за структурно-текстурними ознаками ландшафтних зон. При комп'ютерній обробці зображень використовувався математичний апарат просторово-частотного і кореляційного аналізу. Показана можливість класифікації ландшафтних зон за типами на основі матриць суміжних імовірностей контрастів.

Распознавание ландшафтных зон (ЛЗ) по космическим снимкам необходимо для обоснования различных мероприятий в сельском, лесном и водном хозяйствах, для задач городского и промышленного строительства и др.

Возросшие возможности компьютерных средств обработки информации позволяют при дешифрировании космических снимков наряду с оптическими спектральными признаками использовать пространственные структурные (форма, размер, относительное положение и ориентация элементов ЛЗ) и текстурные (тонкое строение элементов ЛЗ, проявляющееся в изменении яркости) характеристики изображений, что дает возможность с большей вероятностью дешифрировать космические снимки ЛЗ.

Известно, что одним из информативных структурно-текстурных признаков изображений ЛЗ является их пространственно-частотный спектр (ПЧС) [3]. Изменению яркости и координат точек в плоскости предмета или его изображения в терминах спектрального анализа соответствует изменение амплитуды и фазы по пространственным частотам. Таким образом, изображению ЛЗ, имею-

щему определенную структуру, соответствует ПЧС, характеризующийся суммой пространственных составляющих (гармоник) с соответствующими амплитудами и фазовыми сдвигами этих составляющих. Значения амплитуд определяют вклад соответствующих пространственных частот в формирование изображения, а значения фазовых сдвигов определяют изменение координат отдельных точек в изображении относительно их положения в объекте. Неискаженному изображению соответствует область пространственных частот, в пределах которой характеристика фазового ПЧС аппаратуры равна нулю, т. е. в изображении сохраняются первоначальные координаты различных точек объекта. В качестве ПЧС наиболее часто используются двумерные спектры Фурье. Их  $C(n, m)$  вычисляются по методу дискретного двумерного преобразования Фурье в соответствии с выражением [1]

$$C(n, m) = \frac{1}{AB} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} L(x, y) \exp\{-[(nx/A) + (my/B)]\}, \quad (1)$$

где  $n, m$  — номера пространственных гармоник по

осям  $X, Y$ ;  $x, y$  — номера пикселей в пределах выделенного фрагмента по осям  $X, Y$ ;  $L(x, y)$  — распределение яркости в изображении;  $A, B$  — количество отсчетов по осям  $X, Y$ .

Разработанная в Центре аэрокосмических исследований Земли (ЦАКИЗ) ИГН НАН Украины программа позволяет на основе вычисления ПЧС изображений ЛЗ определять преимущественное направление развития протяженных структур. Необходимость последнего возникает при исследовании по космическим снимкам рельефа местности, выделении линеаментов геологических структур, определении преимущественного направления водных потоков, расположения лесопосадок и др. Так, если в исходном изображении имеются протяженные структуры разного направления, то будет наблюдаться расширение ПЧС в направлении, перпендикулярном к направлению наибольшей их протяженности. Измеряя распределение интенсивности спектра по угловой координате, можно определить доминирующие направления и соотношение их суммарной протяженности. В этом случае для амплитудного спектра, преобразованного в полярные координаты, определяется функция распределения амплитудной составляющей по направлениям. Угол, соответствующий направлению с максимальным значением амплитудной составляющей, указывает доминирующее направление протяженной структуры. Предлагаемый подход был апробирован при анализе доминирующих направлений рукавов устьев рек, геологических разломных структур и лесопосадок. На рис. 1, *a* изображен космический снимок участка устья Днепра, а на рис. 1, *б* график азимутального распределения ПЧС изображения. При сопоставлении графика с изображением можно отметить, что направлению основного русла соответствует пик ПЧС под углом примерно  $30^\circ$ , причем энергетически достаточно насыщенный, что указывает на преобладание более низких частот. Множеству мелких рукавов и протоков, направление которых совпадает с осью абсцисс, соответствуют участки спектра в области углов  $10^\circ$  и  $180^\circ$ . Пики ПЧС, расположенные под углом  $90^\circ$  и  $160^\circ$ , соответствуют локальным линейным объектам, не совпадающим с направлением русла реки. График углового распределения ПЧС фрагмента изображения (рис. 1, *б*) построен в условных координатах, однако пересчет их в географические координаты для привязки к местности трудностей не представляет.

На рис. 2, *a* приведены результаты дешифрирования космического снимка участка земной поверхности в зоне разломных образований. Известно, что определение путем непосредственных измере-

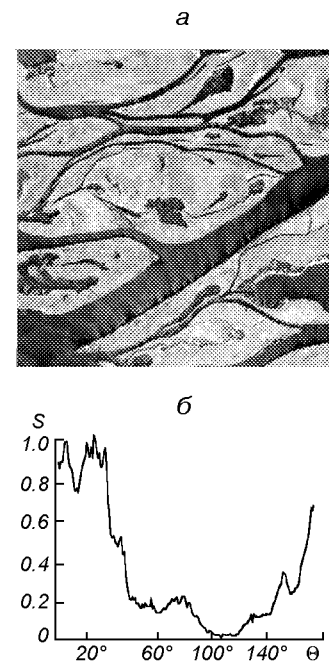


Рис. 1. Определение преимущественного направления водных потоков: *a* — фрагмент космического снимка участка устья реки Днепр, *б* — график азимутального распределения ПЧС изображения

ний направлений линеаментов и соотношений их интенсивностей является довольно трудоемким процессом. Эта задача значительно упрощается в при использовании компьютерной обработки ПЧС линеаментов на основе метода пространственно ориентированной фильтрации. На рис. 2, *б* изображено распределение амплитуд ПЧС в функции угловой ориентации фильтра. Кроме непосредственного определения направления линеаментов, возможно измерение соотношений линеаментов по различным направлениям путем подсчета числа ординат, взятых с определенным шагом в локальных зонах.

Эффективность пространственного спектрального анализа возрастает при наличии в анализируемом изображении периодически расположенных структур (лесопосадок, сельхозкультур и др.), а также с повышением разрешающей способности космических снимков.

Фазовые ПЧС нами использовались для автоматического определения величины смещения объекта. Задача решается путем сравнения фазовых ПЧС, полученных при начальном и конечном положениях объекта. На рис. 3 приведен пример использования фазовых ПЧС для вычисления по

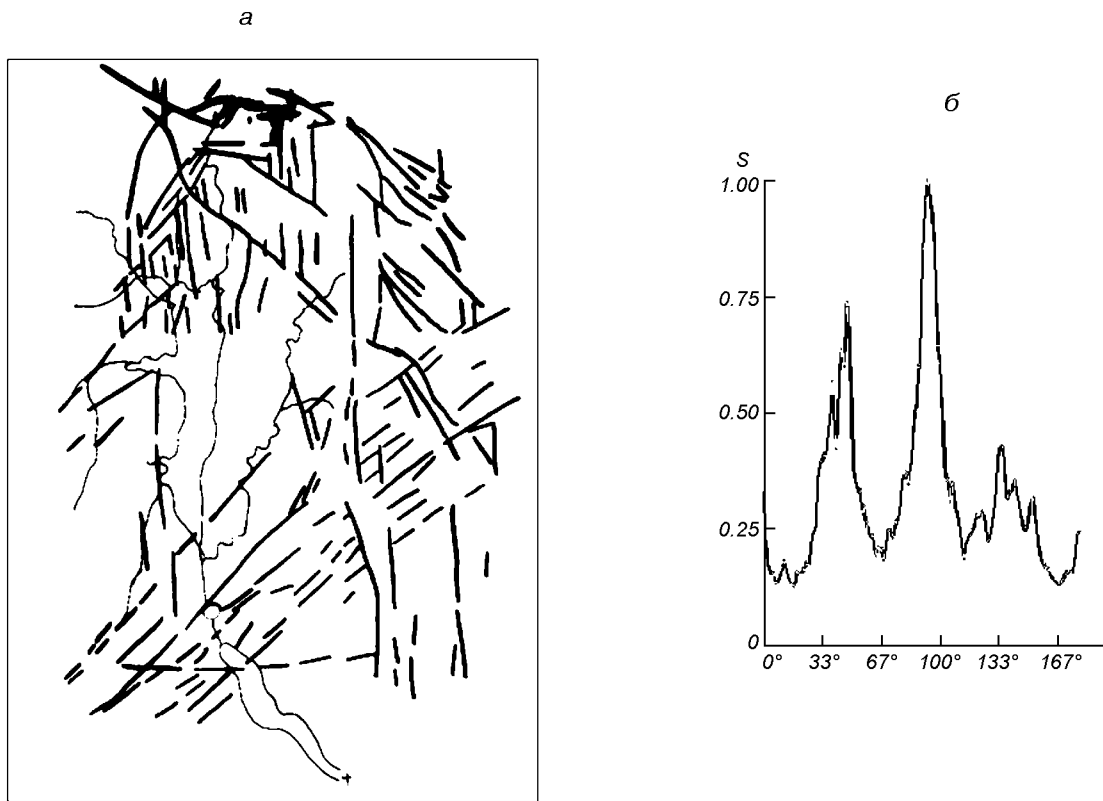


Рис. 2. Определение направлений в изображении линейных структур геологических разломов: *а* — схема распределения линеаментов, *б* — график азимутального распределения ПЧС изображения

снимку расстояния, на которое переместился объект. Смещению изображения объекта (рис. 3, *а*) на определенное число пикселей соответствует такое же число периодов разности фазовых составляющих спектра, а точность измерения координат соответствует одному пикселу изображения. Приведенный на рис. 3, *б* график разности фазовых составляющих ПЧС двух изображений содержит шесть периодов изменения фазы. Метод измерения смещений с помощью фазового ПЧС может быть применен при автоматическом анализе разновременных космических снимков, например для оценки изменений береговой линии, возникновения мелководий и островов в руслах рек, контроле лесопосадок и посевов сельхозкультур и др. Возможен еще один подход к дешифрированию изображений ЛЗ по структурно-текстурным признакам. Известно, что для изображений, к которым можно отнести элементы ЛЗ (водная поверхность, городская застройка, лес, поле, кустарник и др.), коэффициенты автокорреляции яркости изображения достаточно точно аппроксимируются экспоненциальными функциями [1]. Это позволяет в качестве

стохастической модели изображений ЛЗ использовать случайный двухмерный марковский процесс первого порядка. Математической формой описания марковской модели изображения является матрица смежных вероятностей (МСВ) значений яркости космического снимка. Учитывая, что яркость изображения обычно передается 8-разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ такого процесса принимает вид

$$P = \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & P_{0,2} & \dots & P_{0,j} & \dots & P_{0,255} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,j} & \dots & P_{1,255} \\ P_{2,0} & P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,j} & \dots & P_{2,255} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i,0} & P_{i,1} & P_{i,2} & \dots & P_{i,j} & \dots & P_{i,255} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{255,0} & P_{255,1} & P_{255,2} & \dots & P_{255,j} & \dots & P_{255,255} \end{pmatrix}.$$

Элемент  $P_{ij}$  матрицы  $P$  является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселей,

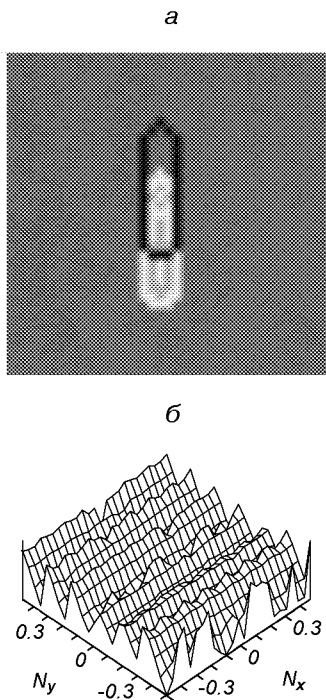


Рис. 3. К определению расстояния между двумя положениями изображений объекта: *a* — изображение двух положений объекта, *б* — график разности фазовых составляющих ПЧС двух изображений объекта

имеющих значения оптической яркости  $i$  и  $j$ . Величина  $P_{ij}$  определяется как отношение количества пар соседних пикселей, имеющих яркости  $i$  и  $j$ , к общему числу различных сочетаний значений яркости в изображении ЛЗ. Полученная МСВ служит основой для вычисления структурных признаков ЛЗ, например приведенных в работах [4, 5], по которым ЛЗ дешифрируются автоматически.

Следует отметить, что МСВ, имея размер  $256 \times 256$  элементов, громоздка для вычислений. Нами для составления МСВ были использованы значения разности яркостей  $\Delta$  смежных пикселей (яркостных контрастов). Такой подход позволяет исключить из анализа значения яркости пикселей, заменив их значениями  $\Delta$ . Для яркостных контрастов МСВ превращается в матрицу-столбец смежных вероятностей контрастов (МСВК), что является преимуществом по сравнению с выше описанным подходом, так как позволяет получить структурные признаки, менее чувствительные к изменению освещенности, и при этом значительно сократить объем вычислений.

Исходя из того, что МСВК симметрична, для сокращения вычислений рассчитывались абсолют-

ные значения  $\Delta$  в окрестностях каждого пикселя по формуле

$$\Delta = \left| L(x, y) - \frac{1}{4} [L(x+1, y) + L(x-1, y) + L(x, y+1) + L(x, y-1)] \right|, \quad (2)$$

где  $L(x, y)$  — яркость пикселя,  $x$  и  $y$  — координаты пикселей в изображении.

В дальнейшем производился подсчет количества одинаковых значений  $\Delta$  для всего диапазона от 0 до 255 и осуществлялось определение оценок вероятностей  $P_{\Delta}$  их наличия в изображении.

На основе МСВК был предложен метод классификации изображений различных ЛЗ по их типам. Техника этого метода основана на последовательности следующих операций: построение базы в виде  $P_{\Delta}^*$  для эталонных тестовых участков различных типов ЛЗ; определение усредненных значений  $P_{\Delta}^*$  и их доверительных интервалов по однотипным тестовым участкам; оценка распознаваемости  $P_{\Delta}^*$  для эталонных участков ЛЗ в пространстве МСВК; отсев минимальных значений  $P_{\Delta}^*$ ; определение расстояний  $F_i$  по формуле (3) в пространстве МСВК между значениями  $P_{\Delta}$  для исследуемого участка ЛЗ и  $P_{\Delta}^*$  для эталонных участков; вычисление функции принадлежности  $F_{pi}$  по формуле (4); классификация исследуемого участка ЛЗ по максимальному значению  $F_{pi}$ .

$$F_i = \sum_{\Delta=1}^s (P_{\Delta} - P_{\Delta}^*), \quad (3)$$

$$F_{pi} = 1 - \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max}}. \quad (4)$$

С помощью рассмотренного метода были определены эталонные значения  $P_{\Delta}^*$  по тестовым участкам пяти различных ЛЗ (водная поверхность, городская застройка, лес, поле, кустарник). Для этого были использованы космические снимки Киевской области, полученные французским спутником «Спот», и результаты соответствующих наземных наблюдений. По каждому из пяти видов ЛЗ было обработано 16 тестовых участков с последующим усреднением результатов измерений. В дальнейшем полученные структурно-текстурные характеристики тестовых участков использовались в качестве эталонов при анализе космических снимков ЛЗ. Результаты эксперимента по отбору эталонных участков ЛЗ и расчета нормированных значений  $P_{\Delta}^*$  и их доверительных интервалов приведены в табл. 1. Яркостные контрасты от 15 до 255 единиц, ввиду

Таблица 1. Нормированные значения  $P_{\Delta}^*$  и их доверительные интервалы

$\delta$	$P_{\Delta}^*$									
	тип ЛЗ									
	Водная поверхность		Городская застройка		Лес		Поле		Кустарник	
0	49.4	$\pm 2.4$	2.6	$\pm 0.3$	18.2	$\pm 1.6$	8.5	$\pm 0.8$	7.8	$\pm 0.7$
1	44.5	1.2	5.4	0.4	30.2	1.3	15.8	1.3	15.7	1.5
2	5.5	1.1	5.5	0.4	20.4	0.7	15.1	0.7	14.4	1.1
3	0.5	0.3	5.3	0.3	12.6	0.9	12.9	0.4	11.8	0.9
4	0.1	0.1	5.2	0.4	7.5	0.8	11.4	0.7	10.1	0.6
5	0	0	5.1	0.3	4.1	0.6	9.2	0.5	8.2	0.5
6	0	0	4.8	0.3	2.2	0.4	7.2	0.5	6.7	0.5
7	0	0	4.5	0.3	1.6	0.3	5.8	0.6	5.1	0.4
8	0	0	4.6	0.4	0.9	0.2	4	0.4	4.2	0.6
9	0	0	4.1	0.2	0.6	0.2	3	0.4	3.3	0.3
10	0	0	4	0.3	0.5	0.2	2.1	0.3	2.5	0.4
11	0	0	3.7	0.2	0.3	0.1	1.6	0.2	2	0.4
12	0	0	3.5	0.3	0.2	0.1	1.1	0.1	1.6	0.3
13	0	0	3.4	0.2	0.2	0.1	0.5	0.1	1.3	0.3
14	0	0	3.2	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	1	0.4
15	0	0	2.8	0.3	0.1	0	0.3	0.1	0.9	0.3
15—255	0		32.3		0.3		1		3.4	

Таблица 2. Результаты определения расстояний  $F_i$  и функций принадлежности  $F_{pi}$  по трем каналам космического снимка «Спот»

Канал	$F_i / F_{pi}$				
	Тип ЛЗ				
	Водная поверхность	Городская застройка	Лес	Поле	Кустарник
IR	0.1 / 0	0.03 / 0.71	0.04 / 0.66	0.01 / 1	0.025 / 0.8
R	0 / 0.86	0.05 / 0.38	0 / 0	0.004 / 1	0.021 / 0.76
G	0 / 0.95	0.04 / 0.54	0 / 0	0.005 / 1	0.022 / 0.75
$\Sigma$	0.1 / 0	0.07 / 0.33	0.04 / 0.68	0.01 / 1	0.039 / 0.66

их небольшого количества, объединены в одну строку.

Как видно из табл. 1, каждый вид ЛЗ характеризуется своим распределением значений коэффициентов матрицы  $P_{\Delta}^*$ , что является информативным признаком при автоматическом дешифрировании ЛЗ и их классификации по структурно-текстурным характеристикам.

Дешифрирование космических снимков ЛЗ на основе МСВК может быть выполнено с использованием нескольких спектральных слоев. Для этого производится классификация участков ЛЗ для каждого из каналов в соответствии с выражениями (3), (4), а затем по формуле (5) определяется расстояние  $F_{\Sigma}$  в пространстве всех спектральных слоев и вновь рассчитывается функция принадлежности  $F_{p\Sigma}$  по формуле (4).

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^L F_i. \tag{5}$$

Экспериментальная проверка метода дешифрирования ЛЗ на основе МСВК заключалась в выборе на космическом снимке нескольких различных участков ЛЗ для дальнейшей классификации на основе сформированной по всем спектральным слоям базы  $P_{\Delta}^*$ . Для каждого исследуемого участка были определены  $P_{\Delta}$  в трех спектральных каналах, составлена МСВК и определена функция принадлежности  $F_{pi}$  в многомерном пространстве значений  $P_{\Delta}^*$  и  $P_{\Delta}$ . Результаты определения расстояний  $F_i$  и значений функций принадлежности  $F_{pi}$  по трем каналам и их суммы ( $\Sigma$ ) космического снимка «Спот» для одного из участков ЛЗ представлены в табл. 2: ( $F_i / F_{pi}$ ).

Из табл. 2 видно, что по максимальному значению  $F_{pi} = 1$ , исследованный участок ЛЗ относится к типу ЛЗ «Поле».

Проверка методики классификации ЛЗ на основе МСВК при обработке 15 различных участков космических изображений дала значение вероятности правильной классификации 0.8, что для большинства задач, связанных с районированием территорий, является приемлемым результатом.

Рассмотренные некоторые компьютерные методы демонстрируют возможность использования структурно-текстурных признаков для автоматического дешифрирования космических снимков ЛЗ с помощью простых алгоритмов цифровой обработки изображений. Наибольший эффект может быть получен при комплексном использовании последних в сочетании со спектрально-анализом изображений в условиях контролируемой классификации.

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Наука, 1978.—848 с.

2. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. — М.: Радио и связь, 1986.—248 с.
3. Янутш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: Недра, 1991.—240 с.
4. Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE.—1979.—67, N 5.—P. 786.
5. Kourgli A., Belhadj-Aissa A. Textural classification using textural signatures // Remote sensing in the 21st century: economic and environmental applications / Ed. Casanova. — Balkema, Rotterdam, 2000.—P. 557—561.

---

#### INTERPRETATION OF SPACE SNAPSHOTS OF LANDSCAPE ZONES ON THE BASIS OF THE STRUCTURAL ANALYSIS

A. D. Fedorovsky, V. G. Yakimchuk, R. I. Novikov,  
I. P. Pakhomov, K. Yu. Sukhanov, and A. A. Teremenko

The methods of an interpretation of space snapshots of landscape zones till them structural to attributes are considered. With computer processing of the images the mathematical device spatial-frequency and correlation analysis was used. The opportunity of classification of landscape zones for types is shown on the basis of matrixes of adjacent probabilities of contrasts.