

ДЕШИФРИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ЛАНДШАФТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук,
И. П. Пахомов, К. Ю. Суханов,
С. А. Рябоконеко

Центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук НАН Украины
г. Киев, ул. Олеса Гончара, 55-Б
E-mail: casre@casre.kiev.ua

Рассмотрены способы дешифрирования космических снимков ландшафтных комплексов по их структурно-текстурным признакам. При компьютерной обработке изображений использовался математический аппарат пространственно-частотного и корреляционного анализа. Показана возможность классификации ландшафтных комплексов по типам на основе матриц смежных вероятностей контрастов.

Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов (ЛК) необходимо для обоснования различных мероприятий, связанных с сельским, лесным и водным хозяйствами, задачами 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 ЛК) и текстурные (тонкое строение элементов ЛК, проявляющееся в изменении яркости) характеристики изображений, что дает возможность с большей вероятностью дешифрировать космические снимки ЛК.

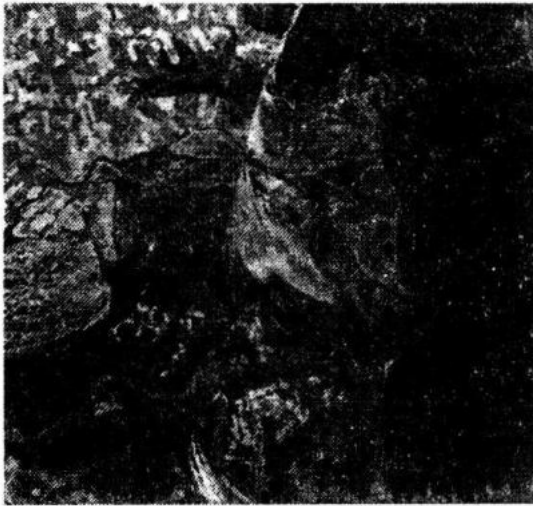
Известно, что одним из информативных структурно-текстурных признаков изображений ЛК является их пространственно-частотный спектр (ПЧС) [1]. Изменению яркости и координат точек в плоскости предмета или его изображения в терминах спектрального анализа соответствует изменение амплитуды и фазы по пространственным частотам. Таким образом изображению ЛК, имеющему 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 фазо-

вых сдвигов определяют изменение координат отдельных точек в изображении относительно их положения в объекте. Неискаженному изображению соответствует область пространственных частот, в пределах которой в изображении сохраняются первоначальные координаты различных точек объекта. В качестве ПЧС наиболее часто используются двухмерные спектры Фурье. Составляющие ПЧС - $C(n, m)$ вычисляются по методу дискретного двухмерного преобразования Фурье в соответствии с выражением [2]:

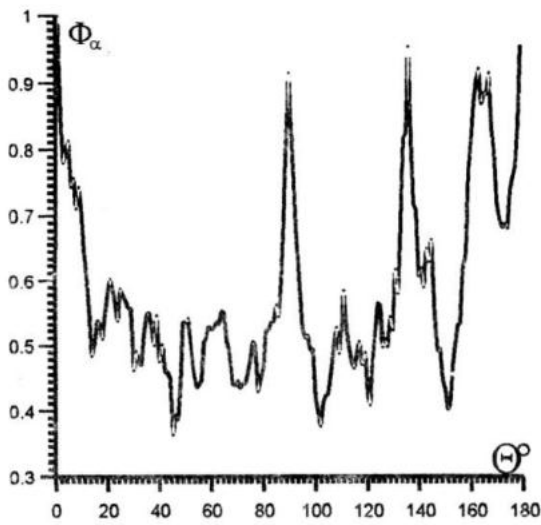
$$C(n, m) = \frac{1}{A \cdot B} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} \{L(x, y) \times \exp - [(nx / A) + (my / B)]\} \quad (1)$$

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 ЛК определять преимущественное направление развития протяженных структур. Необходимость последнего возникает при исследовании по космическим снимкам рельефа местности, выделении линейментов 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 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.



а

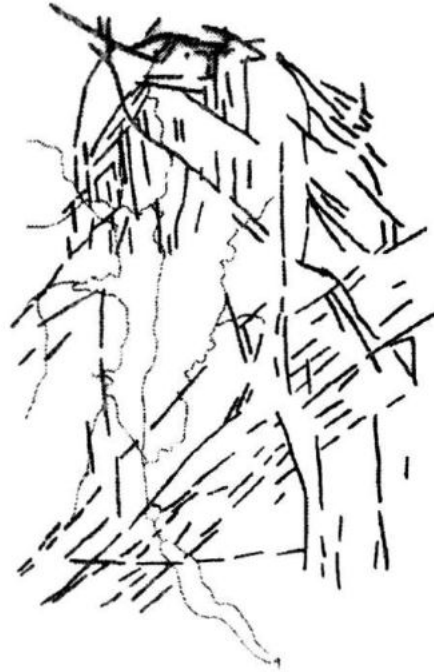


б

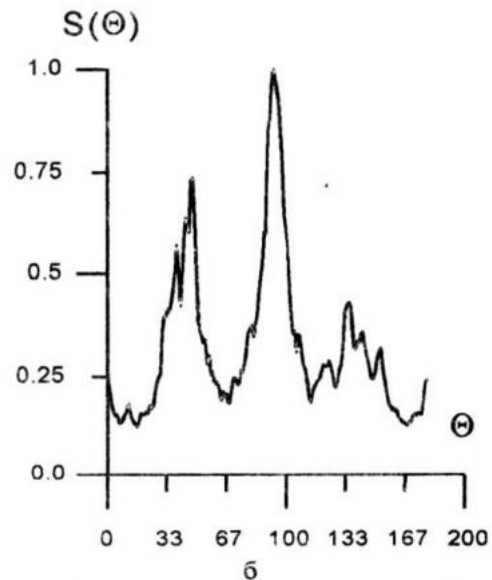
Рис. 1. Определение доминирующих потоков и рукавов Килийской дельты Дуная: а) - фрагмент космического снимка МСУ-В, КА «Океан-О», 02.08.00г., б) - график соотношения интенсивности водных потоков разных направлений.

На рис. 1а изображен фрагмент космического снимка Килийской дельты Дуная (МСУ-В КА «Океан-О» от 02.08.00 г.), а на рис. 1б - распределение функции азимутальной спектральной плотности (АСП) изображения, по максимумам которой определяются ориентации доминирующих потоков. По оси абсцисс отложены значения углов ориентации Θ спектральных составляющих, а по оси ординат - значения их амплитуд (Φ). Пик на 0° (или 180°) соответствует ориентации основного русла. Малая ширина этого пика соответствует тому, что на снимке основное русло расположено почти прямоли-

нейно. Область пиков $100^\circ \pm 170^\circ$ соответствует ориентации рукавов, энергетическая мощность которых превышает мощность основного русла. График углового распределения ПЧС фрагмента изображения (рис.1б) построен в условных координатах, однако пересчет их в географические координаты для привязки к местности трудностей не представляет.



а



б

Рис. 2. Определение направлений в изображении линейных структур геологических разломов.: а) - схема распределения линеаментов, б) - график соотношения интенсивности линеаментов разных направлений.

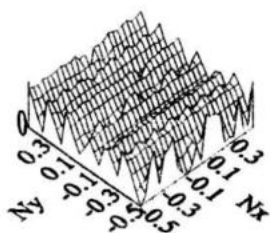
На рис. 2а приведены результаты дешифрирования космического снимка участка земной поверхности в зоне разломных образований. Известно, что определение путем непосредственных измерений направлений линеаментов и соотношений их интенсивностей является достаточно трудоемким процессом. Эта задача значительно упрощается в результате использования компьютерной обработки ПЧС линеаментов на основе метода пространственно ориентированной фильтрации. На рис. 2б 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.



а



б

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

На рис. 3 приведен пример использования фазовых ПЧС для вычисления по снимку расстояния, на которое переместился объект.

Смещению изображения объекта (рис. 3а) на определенное число пикселей соответствует такое же число периодов разности фазовых составляющих спектра, а точность измерения координат соответствует одному пикселу изображения. Приведенный на рис. 3б 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 ЛК [3, 4] по структурно-текстурным признакам.

Для космических изображений таких составляющих ЛК как лесная и сельскохозяйственная растительность, водная поверхность, городская застройка функции автокорреляции имеют вид убывающих зависимостей, которые аппроксимируются экспоненциальными функциями с показателями степени в диапазоне $-0.2, \dots, -0.7$. Поэтому вероятностную зависимость значений яркости пикселей космического снимка (КС) можно представить в виде марковской модели [5, 6]. В соответствии с определением марковских процессов, плотность вероятности значений яркости пиксела изображения с координатами x и y , как элемента m -связного марковского поля, зависит только от яркости тех пикселей дискретизированного изображения, расстояние до которых не превышает расстояния равного m . В случае минимальной окрестности m , равной удалению на один пиксел, имеем окрестность, состоящую из четырех пикселей с координатами $(x-1, y)$, $(x+1, y)$, $(x, y-1)$ и $(x, y+1)$. Этот случай является наиболее простым, так как его можно свести к простой (одно-связной) и одномерной марковской цепи путем усреднения вероятностей по двум осям. При расстоянии равном значению $m = \sqrt{2}$ пикселей к окрестности размера $m=1$ добавляются еще пиксели с координатами $(x-1, y-1)$, $(x-1, y+1)$, $(x+1, y-1)$ и $(x+1, y+1)$ и окрестность состоит из 8-ми пикселей. При расстоянии $m=2\sqrt{2}$ пикселей окрестность состоит из 16-ти пикселей, которые обрамляют снаружи окрестность из 8-ми пикселей.

В случае окрестности $m = \sqrt{2}$ математической формой описания двумерной марковской модели изображения является матрица переходных вероятностей значений яркости I_1 и I_2 соседних пикселей КС, которую также называют матрицей смежных вероятностей (МСВ) [7].

При этом пиксел с координатами x, y имеет яркость I_1 , а значение I_2 является средним значением яркости пикселов из окрестности $m = \sqrt{2}$. Учитывая, что яркость изображения обычно передается 8-ми разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ имеет размер 256^2 элементов. Элемент P_{12} матрицы является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселов, имеющих значения оптической яркости I_1 и I_2 . Величина P_{12} определяется как отношение количества пар смежных пикселов, имеющих яркости I_1 и I_2 , к общему числу различных сочетаний значений яркости в анализируемом изображении ЛК. Для окрестности $m = 2\sqrt{2}$ матрица смежных вероятностей значений яркости соседних пикселов (L_1, L_2 и L_3) означает, что яркость L_1 имеет пиксел с координатами x, y , значение L_2 является средним значением яркости пикселов окрестности $m = \sqrt{2}$, значение L_3 - средним значением яркости пикселов на расстоянии $m = 2\sqrt{2}$. Для окрестности $m = 2\sqrt{2}$ МСВ имеет размер 256^3 элементов, поэтому для упрощения вычислений в качестве вероятностной модели изображений ЛК выбирается марковская модель связности $m = \sqrt{2}$.

Математической формой описания марковской модели изображения является матрица смежных вероятностей (МСВ) значений яркости космического снимка. Учитывая, что яркость изображения обычно передается 8-ми разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ такого процесса (P) принимает вид:

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

Элемент p_{ij} матрицы P является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселов, имеющих значения оптической яркости i и j . Величина p_{ij} определяется как отношение количества пар соседних пикселов, имеющих яркости i и j , к общему числу различных сочетаний значений яркости в изображении ЛК.

МСВ служат основой для вычисления структурных признаков ЛК. Известные методы оценки пространственной структуры изображений на основе статистических характеристик МСВ заключаются в вычислении совокупности параметров Харалика [7] или значений взаим-

ной корреляционной функции для МСВ исследуемого и эталонного объекта [2].

Следует отметить, что МСВ, имеющая размер 256×256 элементов, громоздка для вычислений. Нами для составления МСВ были использованы значения разности яркостей смежных пикселов - Δ (яркостных контрастов). Такой подход позволяет исключить из анализа значения яркости пикселов, заменив их значениями Δ . Для яркостных контрастов МСВ превращается в матрицу-столбец смежных вероятностей контрастов (МСВК), что является преимуществом в сравнении с выше описанным подходом, т. к. позволяет получить структурные признаки, менее чувствительные к изменению освещенности, и при этом значительно сократить объем вычислений.

В итоге были получены матрицы оценок вероятностей значений контрастов яркости $p(\Delta)$, $\forall \Delta \in \overline{0, 2^N - 1}$, где $2^N \times 1$ - размерность этих матриц, N - разрядность цифрового снимка. Элемент матрицы вероятностей $p(\Delta)$ является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселов, контраст яркостей которых - Δ . Величина $p(\Delta)$ определяется как отношение количества пар смежных пикселов, имеющих яркости L_1 и $L_1 - \Delta$ или L_1 и $L_1 + \Delta$, к общему числу различных контрастов значений яркости в анализируемом изображении ЛК.

Исходя из того, что МСВК симметрична, для сокращения вычислений рассчитывались абсолютные значения Δ в окрестностях каждого пиксела по формуле:

$$\Delta = \left| I(x, y) - \frac{1}{4} [I(x+1, y) + I(x-1, y) + L(x, y+1) + L(x, y-1)] \right| \quad (3)$$

где $L(x, y)$ - яркость пиксела, x и y - координаты пикселов в изображении.

В дальнейшем производился подсчет количества одинаковых значений Δ для всего диапазона Δ от 0 до 255 и осуществлялось определение оценок вероятностей их присутствия в изображении - P_Δ ($\Delta = 0, 1, \dots, 255$).

На основе МСВК был предложен метод классификации изображений различных ЛК по их типам. Техника этого метода основана на последовательности следующих операций: построение базиса в виде P_Δ^* для эталонных тестовых участков различных типов ЛК; определение усредненных значений P_Δ^* и их доверительных интервалов по однотипным тестовым участкам; оценка распознаваемости P_Δ^* для эталонных участков ЛК в пространстве МСВК; отсев минимальных значений P_Δ^* ; определение

расстояний F_i по формуле (4) в пространстве МСВК между значениями P_Δ для исследуемого участка ЛК и P_Δ^* для эталонных участков; вычисление функции принадлежности F_{pi} по формуле (5); классификация исследуемого участка ЛК по максимальному значению F_{pi} .

$$F_i = \sum_{\Delta=1}^S (P_\Delta - P_\Delta^*)^2 \quad (4)$$

$$F_{pi} = 1 - \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (5)$$

С помощью рассмотренного метода были определены эталонные значения P_Δ^* по тестовым участкам пяти различных ЛК (водная поверхность, городская застройка, лес, поле, кустарник). Для этого были использованы космические снимки Киевской области, полученные французским спутником Spot, и результаты соответствующих наземных наблюдений. По каждому из пяти видов ЛК 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 ЛК. Результаты эксперимента по отбору эталонных участков ЛК и расчета нормированных значений P_Δ^* и их доверительных интервалов (D) приведены в таблице 1. Яркостные контрасты от 15 до 255 единиц градационной шкалы, ввиду их небольшого количества, объединены в одну строку.

Как видно из таблицы 1, каждый вид ЛК характеризуется своим распределением значений коэффициентов матрицы P_Δ^* , что является информативным признаком при автоматическом дешифрировании ЛК и их классификации по структурно-текстурным характеристикам.

Дешифрирование космических снимков ЛК на основе МСВК может быть выполнено с использованием нескольких спектральных слоев. Для этого производится классификация участков ЛК для каждого из каналов в соответствии с выражениями (4), (5), а затем по формуле (6) определяется расстояние F_Σ в пространстве всех спектральных слоев и вновь рассчитывается функция принадлежности $F_{p\Sigma}$ в соответствии с выражением (5).

$$F_\Sigma = \sum_{l=1}^L F_l \quad (6)$$

Экспериментальная проверка метода дешифрирования ЛК на основе МСВК заключалась в выборе на космическом снимке несколь-

ких различных участков ЛК для дальнейшей классификации на основе сформированной по всем спектральным слоям базы P_Δ^* . Для каждого исследуемого участка были определены P_Δ в трех спектральных каналах, составлена МСВК и определена функция принадлежности F_{pi} в многомерном пространстве значений P_Δ^* и P_Δ . Результаты определения расстояний F_i и значений функций принадлежности F_{pi} по трем каналам и их суммы (Σ) космического снимка Spot для одного из участков ЛК представлены в таблице 2 в виде отношения F_i / F_{pi} .

Из таблицы 2 видно, что по максимальному значению $F_{pi} = 1$, исследованный участок ЛК относится к типу ЛК "поле".

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

Матрицы вероятностей контрастов могут быть использованы для при решении задач дешифрирования КС на основе техники декомпозиции относительных площадей участков составляющих ЛК, а также для дешифрирования ЛК по их пространственно-частотным спектрам - пространственным спектрам Фурье. В последнем случае в качестве «контрастов» выступают приращения составляющих смежных частот пространственного спектра.

Для этих задач необходимо располагать базой данных космических изображений различных эталонных тестовых участков, составляющих ЛК. В задаче декомпозиции составляющих ЛК случае для каждого выбранного эталонного участка по яркости изображений определяются усредненные значения $p(\Delta)$

($\forall \Delta \in \overline{0,2^N - 1}$) и их доверительные интервалы. Затем выполняются следующие операции:

1. Оценка взаимной разделимости характеристик различных по составу эталонных тестовых участков на основе выражения:

$$D_{nk}^{ec} = \sum_{\Delta=1}^l [p_n^{ec}(\Delta) - p_k^{ec}(\Delta)]^2 \quad (7)$$

где D_{nk}^{ec} - расстояние в пространстве Δ между элементами матриц n -го и k -го эталонных тестовых участков, c - порядковый номер спектрального слоя КС, l - максимальное из всех значений Δ , $p_n^{ec}(\Delta)$ и $p_k^{ec}(\Delta)$ - элементы МСВК для n -го и k -го эталонных участков соответственно.

Пороговое значение D^* определяется исходя из значений доверительных интервалов для $p_n^{ec}(\Delta)$ и $p_k^{ec}(\Delta)$. При $D_{nk}^{ec} \geq D^*$ участки, составляющие ЛК, различимы, а при $D_{nk}^{ec} < D^*$ - неразличимы.

2. Определение в каждом спектральном слое КС значений МСВК для ν -ого исследуемого участка ЛК и вычисление расстояния D_{qv}^c между элементами матриц ν -ого исследуемого участка и q -ого эталонного ЛК в пространстве Δ , ($\forall \Delta \in \overline{1, l}$)

$$D_{qv}^c = \sum_{\Delta=1}^l \left[p_q^{ec}(\Delta) - p_v^c(\Delta) \right]^2 \quad (8)$$

где $\forall q \in \overline{1, M}$, M - количество выбранных эталонных участков, $\forall c \in \overline{1, C}$, C - количество спектральных слоев КС.

3. Определение по каждому спектральному слою КС функций принадлежности ν -ого исследуемого участка F_{qv}^c к каждому эталонному участку:

$$F_{qv}^c = 1 - \frac{D_{qv}^c - \min_q(D_{qv}^c)}{\max_q(D_{qv}^c) - \min_q(D_{qv}^c)} \quad (9)$$

где $\max_q(D_{qv}^c)$ и $\min_q(D_{qv}^c)$ - максимальное и минимальное значения D_{qv}^c .

4. Определение функций принадлежности F_{qv}^Σ по всем спектральным слоям КС

$$F_{qv}^\Sigma = \sqrt{\sum_c (F_{qv}^c)^2} \quad (10)$$

По максимальному значению функции F_{qv}^Σ для совокупности всех спектральных слоев КС определяется принадлежность ν -ого исследуемого участка к конкретному типу.

5. В случае неоднородного состава ν -ого исследуемого участка ЛК (например, из двух составляющих) методом декомпозиции определяются соотношения площадей этих составляющих участка.

$$S_{kv} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_c (D_{kv}^c)^2}}{\sqrt{\sum_c (D_{nv}^c)^2} + \sqrt{\sum_c (D_{kv}^c)^2}} \quad (11)$$

$$S_{nv} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_c (D_{nv}^c)^2}}{\sqrt{\sum_c (D_{nv}^c)^2} + \sqrt{\sum_c (D_{kv}^c)^2}}$$

где S_{kv} и S_{nv} - относительные площади на исследуемом участке, занятые k -ым и n -ым типами ЛК.

Для демонстрации метода МСВК и техники декомпозиции при дешифрировании космических изображений ЛК был использован КС SPOT Киевской области в летнее время (рис. 4).

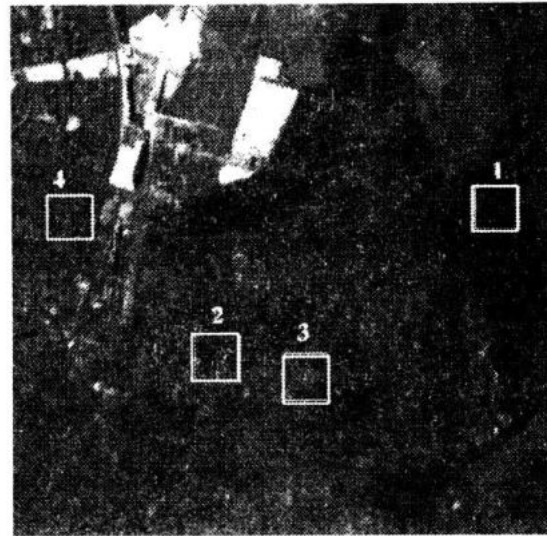


Рис. 4. Фрагмент космического снимка Киевской области (ИСЗ Spot): участок леса - 1, участки, содержащие лес и городскую застройку - 2 и 3, городская застройка - 4.

В качестве эталонных участков на рисунке выбраны фрагменты леса (1) и городской застройки (4), для которых были вычислены МСВК.

МСВК можно представить графически (рис. 5): горизонтальная ось соответствует значениям контрастов яркости - Δ , а вертикальная - значениям вероятности этих контрастов $p(\Delta)$. Представленные графики МСВК для эталонных составляющих ЛК свидетельствуют о достаточном для их классификации различии.

Продолжением эксперимента был выбор на КС двух участков ЛК с неизвестным соотношением площадей, занятых лесом и городской застройкой (2 и 3), с последующим определением этого соотношения. В результате обработки изображений исследуемых участков были определены значения $p^c(\Delta)$ ($\Delta=0, 1, \dots, 31$) в трех спектральных слоях (0.5-0.6; 0.6-0.7; 0.8-0.9 нм) и составлены МСВК для каждого

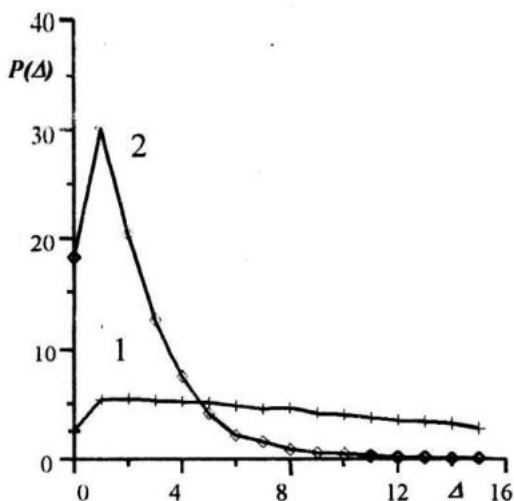


Рис. 5. Графики МСВК: городская застройка - 1, лес - 2.

Таблица 1.
Соотношения площадей леса и городской застройки, составляющих исследуемые участки

Участок	2					
	Лес (1)			Гор. застр.(4)		
Расстояния	$D_{1,2}^1$	$D_{1,2}^2$	$D_{1,2}^3$	$D_{4,2}^1$	$D_{4,2}^2$	$D_{4,2}^3$
	2.2	1.5	2.0	4.2	3.9	5.3
Площади	$S_{1,2}$			$S_{4,2}$		
	0.70			0.299		
Участок	3					
	Лес (1)			Гор. застр.(4)		
Расстояния	$D_{1,3}^1$	$D_{1,3}^2$	$D_{1,3}^3$	$D_{4,3}^1$	$D_{4,3}^2$	$D_{4,3}^3$
	4.3	5.6	6.0	3.8	4.3	5.0
Площади	$S_{1,3}$			$S_{4,3}$		
	0.45			0.549		

спектрального слоя. По формуле (8) были определены расстояния D_{qv}^c , на основании значений которых в соответствии с (11) были определены относительные площади составляющих исследуемые участки ЛК (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие обозначения: $D_{1,2}^1$ - расстояние в пространстве Δ между элементами матриц 2-го исследуемого участка и 1-го эталонного участка (лес) для 1-го спектрального канала снимка, $S_{1,2}$ - относительная площадь на 2-м исследуемом участке, занятая 1-ым типом составляющих ЛК (лес). Аналогично для $S_{1,3}$, $S_{4,2}$, $S_{4,3}$, $D_{4,2}^1$, $D_{4,3}^1$ и т. д.

Таким образом, на участке 2 лес составлял 70% территории, а городская застройка 30%. На участке 3 - 45% и 55% соответственно, что с приемлемой для практики точностью было подтверждено наземными измерениями.

Далее рассмотрим возможность применения МСВК для дешифрирования ЛК по их пространственно-частотным спектрам, как двумерным изображениям. В этом случае в качестве информативных характеристик используются структурно-текстурные признаки, которые определяются как вероятности приращений составляющих смежных частот пространственного спектра. Обоснование возможности использования марковской модели изображений для описания ПСФ проводится аналогично, как и для изображений ЛК. В качестве модели составляющих ПСФ можно использовать двумерный марковский процесс в форме матрицы-столбца вероятностей абсолютных значений приращений смежных составляющих пространственного спектра изображений ландшафтов. Матрицу для приращений смежных составляющих ПСФ назовем матрицей вероятностей приращений (МВП).

В литературе [8,9] при анализе комплексных ПСФ, имеющих амплитудную A_{ij} и фазовую φ_{ij} составляющие, чаще рассматриваются амплитудные составляющие, что объясняется ограниченными возможностями оптических построителей пространственных спектров, применяемых в более ранних исследованиях. Учет фазовой составляющей ПСФ представляет интерес, т.к. последняя содержит информацию о текстуре изображения. В дальнейшем с применением вычислительной техники фазовые составляющие также использовались при дешифрировании изображений для устранения таких дефектов как размытость и смаз изображений [1].

В рассматриваемом случае фазовая составляющая учитывалась посредством перехода от комплексного спектра C_{ij} в показательной форме, включающей амплитудную A_{ij} и фазовую φ_{ij} составляющие, к алгебраической форме с действительной R_{ij} и мнимой J_{ij} составляющими:

$$R_{ij} = A_{ij} \cos \varphi_{ij}$$

$$J_{ij} = A_{ij} \sin \varphi_{ij}$$

где i, j - номера гармоник ПСФ по двум осям.

Спектры R_{ij} и J_{ij} , как двумерные процессы были использованы для классификации составляющих ЛК с помощью МВП.

В качестве примера использования метода МВП при классификации космических изображений ЛК по их ПСФ были исследованы участки территории на КС (МСУ-В) "Океан-О" (10.11.1999 г.). В качестве исследуемых были выбраны участки (рис. 6): городская застройка

(1), лес (2) и сельскохозяйственная растительность (3). Их пространственные спектры приведены на рис. 7, обозначения на котором соответствуют рис. 6. Для спектральных изображений исследуемых участков ЛК были определены МВП. Матрицы усредненных значений вероятностей для мнимой составляющей спектра J_{ij} для трех участков составляющих ЛК показаны на рис. 8, где по горизонтальной оси показаны перепады составляющих спектра Δ , а по вертикальной - вероятности наличия приращений соответствующего значения $p_j(\Delta)$. На рисунке видно различие МВП для городской застройки, леса и сельскохозяйственных культур, главным образом, в области небольших значений приращений между спектральными составляющими.

Для оценки возможности классификации ЛК по ПСФ были определены расстояния между МВП одинаковых и разных составляющих ЛК в соответствии с выражением (7). При этом для сравнительной оценки расстояний между МВП принята относительная единица - максимальный разброс значений элементов МВП однотипных составляющих ЛК, а остальные разбросы приведены к этой единице. Значения разбросов, представленные в табл. 2, показывают возможность дешифрирования ЛК при помощи МВП по пространственным спектрам.

Таблица 2. Расстояния между МВП

Вид ЛК Составляющие спектра	Разнотипные составляющие ЛК		Однотипные составляющие ЛК
	мин.	макс	Макс
R_{ij}	1.61	2.16	1.0
J_{ij}	1.72	2.38	1.0

Проведенные исследования показали, что МВП позволяют получить дополнительную информацию при классификации ЛК.

Рассмотренные в работе примеры демонстрируют возможность использовать при дешифрировании космических снимков ЛК по структурным признакам марковские модели изображений в виде матриц вероятностей контрастов

яркости смежных пикселей и матриц вероятностей приращений составляющих смежных пространственных частот спектра. Это расширяет возможности применения структурного анализа при дешифрировании, так как позволяет ослабить влияние изменчивости тона изображений ЛК при различных условиях съемки. Однако ограниченный объем использованного экспериментального материала требует для подтверждения достоверности полученных результатов проведения дальнейших исследований в этом направлении с учетом закономерностей морфологической структуры и природных взаимосвязей составляющих ЛК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Янутш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: "Недра". 1991. 240 с.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М. 1978, 848 с.
3. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. - М.: "Мысль", 1986, 180с.
4. Федоровский А.Д., Якимчук В.Г., Новиков Р.И. и др. Дешифрирование космических снимков: распознавание ландшафтных зон на основе структурного анализа // Космічна наука і технологія. 2000. Т. 6. № 2/3. С. 39-44.
5. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986.- 248 с.
6. Rabiner L.R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition.-Proc. IEEE, 1989. v. 77. № 2, p. 257-285.
7. Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE. 1979. V. 67. №5. P. 786.
8. Залманзон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. - М.: Наука. 1989.-496 с.
9. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. - М.: Радио и связь, 1987.-296 с.