

УДК 553.911.98.

К вопросу дешифрирования космических снимков природных ландшафтов

А. Д. Федоровский

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшла до редакції 28.05.99

Розглядаються методичні питання дешифрування космічних знімків природних ландшафтів на основі ландшафтно-системного підходу і комплексного використання оптичних спектральних і просторово-частотних інформативних ознак. Приводяться результати дослідження критеріїв оцінки та вибору космічних знімків для дешифрування ландшафтних структур.

Космическое ландшафтоведение является одним из научных направлений, активно способствующих исследованию и решению различных природоохранных и природоохранных задач [15, 17]. Изучение и классификация природных ландшафтов (ПЛ) необходимы для проведения геофизического районирования территории, обоснования различных организационно-хозяйственных и технических мероприятий, связанных с землепользованием, сельским хозяйством, задачами лесного и водного хозяйства, городским и гидротехническим строительством. Несмотря на то, что за многие годы эксплуатации природоресурсных спутников Земли накоплен значительный опыт обработки космических снимков ПЛ, работы по совершенствованию методов дешифрирования ПЛ продолжают и в настоящее время. Исследуются различные информативные признаки ландшафтных структур, разрабатываются новые методы дешифрирования, определяются критерии оценки космических изображений ПЛ и т. д. Цель данной работы заключается в рассмотрении некоторых из затронутых вопросов.

Известно, что для определения по космическим снимкам экологического состояния различных ПЛ в качестве информативных признаков широко используются спектры отражения и собственного излучения, коэффициент спектральной яркости и их производные [14, 19]. Однако использование оптических признаков и критериев в ограниченных

спектральных диапазонах не всегда дает положительные результаты. Это обусловлено тем, что перечисленные признаки не являются универсальными, а специфичны для конкретных ландшафтных структур, времени года, вегетационного периода и привязаны к географическому месту [11, 20].

В отличие от методов, использующих для исследования геоэкологических характеристик ПЛ в качестве информативных признаков непосредственно оптические спектральные параметры, существует принципиально иной подход — на основе ландшафтно-системного метода [2, 4]. Суть его заключается в анализе ландшафтного комплекса как сложной системы — природной среды в целом на разных уровнях абстрактного описания с учетом иерархии подсистем — ландшафтных структур, их приоритетов в природной системе и формировании обобщенного критерия классификации ПЛ.

При морфолого-генетическом принципе классификации ПЛ обладают всеми чертами, присущими иерархическим системам. Здесь понятиями более низкого таксонометрического ранга выступают: местности, урочища, для урочищ — фации, для фаций — парцеллы [21]. По совокупности признаков, которые уверенно дешифрируются на аерокосмических снимках, выделяются ландшафтные комплексы, которые классифицируются по типам. В свою очередь, тип ПЛ с достаточной степенью достоверности определяет основные геоэкологиче-

ские характеристики исследуемых регионов и на этой основе косвенными методами обнаруживаются те геоэкологические процессы и явления, которые не поддаются прямому дешифрированию [3, 4]. Для ландшафтных комплексов суши это уровень грунтовых вод, зоны интенсивного накопления загрязнений, участки возможного подтопления [23]. Для аквально-наземных ландшафтов (АНЛ) — гидрхимический и качественный состав водной среды, биопродуктивность, состояние нерестилищ, характеристики подстилающих грунтов и др. [7, 10]. Так, например, по космическим снимкам устьевых зон рек АНЛ можно оценить гидрографическую сеть, обнаружить и вычислить площади, занятые высшей водной растительностью, и определить гидрологический режим мест обитания растительных сообществ, в том числе площадь водного зеркала, интенсивность водообмена, характер береговой линии, тип мелководий, наличие пойменных водоемов, отмелей, рукавов и т. д. По совокупности перечисленных характеристик, полученных в результате дешифрирования космических изображений и заверенных наземными измерениями, производится классификация выделенных на снимке АНЛ по типам [8, 25].

Общеметодические положения системного подхода применимы для анализа большинства сложных систем, однако их реализация в каждом конкретном случае имеет свою специфику и требует формирования своих критериев и создания соответствующей процедуры принятия решения. Рассмотрим принцип применения ландшафтно-системного метода на примере классификации АНЛ по распределению на его площади водных растительных ассоциаций. Представим исследуемый АНЛ* (например, участок устья реки) как природную систему A^* с совокупностью входящих в нее n подсистем нижнего уровня (ассоциациями растений) в виде

$$A^* = [a_1(s_1)^*, a_2(s_2)^*, \dots, a_i(s_i)^*, \dots, a_n(s_n)^*], \quad (1)$$

где $a_i(s_i)^*$ — вид подсистемы (ассоциации растений — a_i^*) с ее текущим параметром s_i^* (площадь, занимаемая ассоциацией растений в системе A^*).

Обозначим как A_j , содержащиеся в базе данных типы АНЛ _{j} , где $j = 1, 2, \dots, k$; k — общее количество АНЛ в базе данных.

Особенностью ПЛ является то, что в естественных условиях под действием различных факторов их структурный состав непрерывно изменяется, что приводит к переходу одного типа ПЛ в другой. В связи с этим точное совпадение параметров исследуемого в естественных условиях АНЛ* с эталонными типами АНЛ _{j} маловероятно. Переменное со-

стояние АНЛ* учитывается путем установления в базе данных границ диапазонов параметров подсистем. В этом случае нижняя граница параметра s_i , подсистемы a_i — $s_i(a_i, A_j)$ и верхняя граница — $\bar{s}_i(a_i, A_j)$. Для подсистем, отсутствующих в A_j , значения границ диапазона устанавливаются равными нулю. Для поиска оптимального решения (определения типа АНЛ _{j}) целесообразно использовать метод теории нечетких множеств [12], который позволяет заменить точную принадлежность исследуемого участка к какому-либо типу АНЛ _{j} на непрерывную функцию принадлежности, определяющую степень соответствия исследуемого АНЛ* каждому типу АНЛ _{j} . Отнесение АНЛ* к конкретному типу производится по максимальному значению функции принадлежности.

При проведении классификации АНЛ* задача решается в два этапа. На первом этапе определяется соответствие ассоциаций растений $a_i(s_i)^*$, произрастающих на исследуемом участке A^* , видовому составу ассоциаций растительности $a_i(s_i)$ в базе данных для всех АНЛ _{j} .

На основе теории нечетких множеств функция соответствия $f(a_i^*, A_j)$ подсистемы $a_i(s_i)^*$ для системы A_j определяется по формуле

$$f(a_i^*, A_j) = \rho_i(a_i, A_j)[\varphi(a_i^*, A_j) - \Delta S_j(a_i^*)/100]. \quad (2)$$

Здесь $\Delta S_j(a_i^*)$ — функция штрафа за несоответствие значения параметра s_i^* подсистемы a_i^* в системе A^* диапазону значений в базе данных соответствующего параметра s_i подсистемы $a_i(s_i)$ в системе A_j :

$$\Delta S_j(a_i^*) = \begin{cases} \underline{s}(a_i, A_j) - s_i^* & \text{при } s_i^* < \underline{s}(a_i, A_j), \\ 0 & \text{при } \underline{s}(a_i, A_j) \leq s_i^* \leq \bar{s}(a_i, A_j), \\ s_i^* - \bar{s}(a_i, A_j) & \text{при } s_i^* > \bar{s}(a_i, A_j), \\ s_i^* & \text{при } \underline{s}(a_i, A_j) = \bar{s}(a_i, A_j) = 0, \end{cases}$$

$\varphi(a_i^*, A_j) = 1$, если подсистема $a_i(s_i)^*$ есть в A_j , и $\varphi(a_i^*, A_j) = 0$ — в противном случае; $\rho_i(a_i, A_j)$ — весовой коэффициент ассоциации a_i в A_j .

На втором этапе решается задача классификации исследуемого участка A^* (АНЛ*) как задача многокритериальной оптимизации в пространстве n критериев [18], каждый из которых является функцией соответствия $f(a_i^*, A_j)$ ассоциации $a_i(s_i)^*$ каждому типу АНЛ _{j} .

Решением исходной задачи многокритериальной оптимизации будет тип АНЛ _{j} *, для которого обобщенный критерий оптимальности или функция принадлежности $f(A, A_j^*)$ достигает наибольшего значения:

$$f(A, A_j^*) = \sum_{i=1}^n \rho_i^* f(a_i^*, A_j) - \sum_{a_i(A) \notin A^*} \rho_i s(a_i, A_j)/100, \quad (3)$$

где ρ_i^* — весовой коэффициент ассоциации a_i^* на участке A^* (АНЛ^{*}).

В формулах (2) и (3) весовые коэффициенты отражают приоритеты подсистем в зависимости от их роли в системе.

Первое слагаемое выражения (3) представляет собой характеристическую функцию принадлежности исследуемого участка A^* определенному типу АНЛ_j. Когда распределение площадей, занятых ассоциациями $a_i(s_i)^*$ на участке A^* , совпадает с распределением площадей соответствующих ассоциаций $a_i(s_i)$ в A_j , то слагаемое $\sum \rho_i^* f(a_i^*, A_j)$ равно единице. Чем больше различия в распределении площадей ассоциаций, тем меньше значение первого слагаемого в формуле (3). Если в A_j нет ни одной подсистемы $a_i(s_i)^*$, характеристическая функция $\sum \rho_i^* f(a_i^*, A_j)$ равна нулю. Второе слагаемое выражения (3) является функцией штрафа за то, что в системе A_j есть подсистемы, не принадлежащие исследуемой системе A^* . Функция штрафа равна нулю, если A_j принадлежат только те подсистемы, которые есть в A^* , и увеличивается с увеличением количества и «веса» несовпадающих подсистем.

На основе изложенного метода в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины была разработана программа, по которой принятие решения о принадлежности того или иного участка к конкретному типу ландшафтного комплекса производится автоматически по максимальному значению функции принадлежности. Разработанная программа классификации ПЛ была апробирована при обработке результатов исследований экологического состояния Килийской дельты Дуная [7] и оценке качества воды в устьевых зонах рек Припять (Киевское водохранилище) [30] и Самара (Запорожское водохранилище) [16].

При ландшафтно-системном методе исследования изображений ПЛ важное значение приобретает распознавание структуры и текстуры элементов ПЛ. Уже в ранних работах по дешифрированию аэрокосмических изображений ПЛ наряду с оптическими спектральными признаками была показана значимость плановой структуры и текстуры изображений ПЛ [1, 4, 5]. В их числе размеры и форма контуров элементов ПЛ, ориентация и взаимное расположение в изображении, а также производные характеристики — пространственные спектры, гистограммы распределения, матрицы смежности и др. [27]. Существующие компьютерные методики об-

работки изображений используют различные способы улучшения их качества в надежде на то, что человек сможет увидеть пространственную мозаику, которую образуют природные объекты. Одними из наиболее информативных признаков пространственной структуры ПЛ являются пространственно-частотные спектры, которые позволяют уменьшить объем информации и в сжатой форме описать структурные особенности того или иного фрагмента изображения. Под пространственно-частотным анализом в данном случае понимается представление двумерного распределения плотности фототона исследуемого фрагмента снимка в виде набора соответствующих пространственных гармоник, называемого пространственно — частотным спектром (ПЧС). Известно, что под пространственным гармоническим распределением яркости в теории построения изображений понимают распределение яркости в плоскости изображения по синусоидальному закону [6]. Пространственными частотами N_x и N_y являются величины, обратные периоду T_x и T_y пространственных гармоник ($N_x = 1/T_x$, $N_y = 1/T_y$). Переход от пространственного распределения плотности фототона к распределению по пространственным частотам осуществляется с помощью преобразований Фурье. При этом значения амплитуды гармонических составляющих определяют соответствующими коэффициентами Фурье-спектров.

Известны работы по исследованию ПЧС природных объектов, которые проводились на основе оптического когерентного спектрального анализа. Так, например, в работе [28] рассматривается структурно-зональный анализ (СЗА) как метод дешифрирования на космических снимках изображений геологических и других объектов. Идея СЗА состоит в преобразовании изображений и получении количественной оценки ПЧС по частотным и азимутальным зонам путем оптической фильтрации наиболее информативных признаков, характеризующих пространственную структуру изображения.

В настоящее время искусственные спутники Земли оснащены оптической сканирующей аппаратурой высокого разрешения, позволяющей получать изображения в цифровой форме. В связи с этим для выявления оптической пространственной структуры изображений различных ПЛ в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины вместо оптического когерентного спектрального анализа был применен чисто цифровой метод, позволяющий использовать широкие возможности современных ЭВМ. На основе последнего была разработана программа, с помощью которой на космическом снимке, отображаемом на дисплее, выделялся фрагмент размером $A \times B$ пикселей и вычислялся его двумерный пространственный

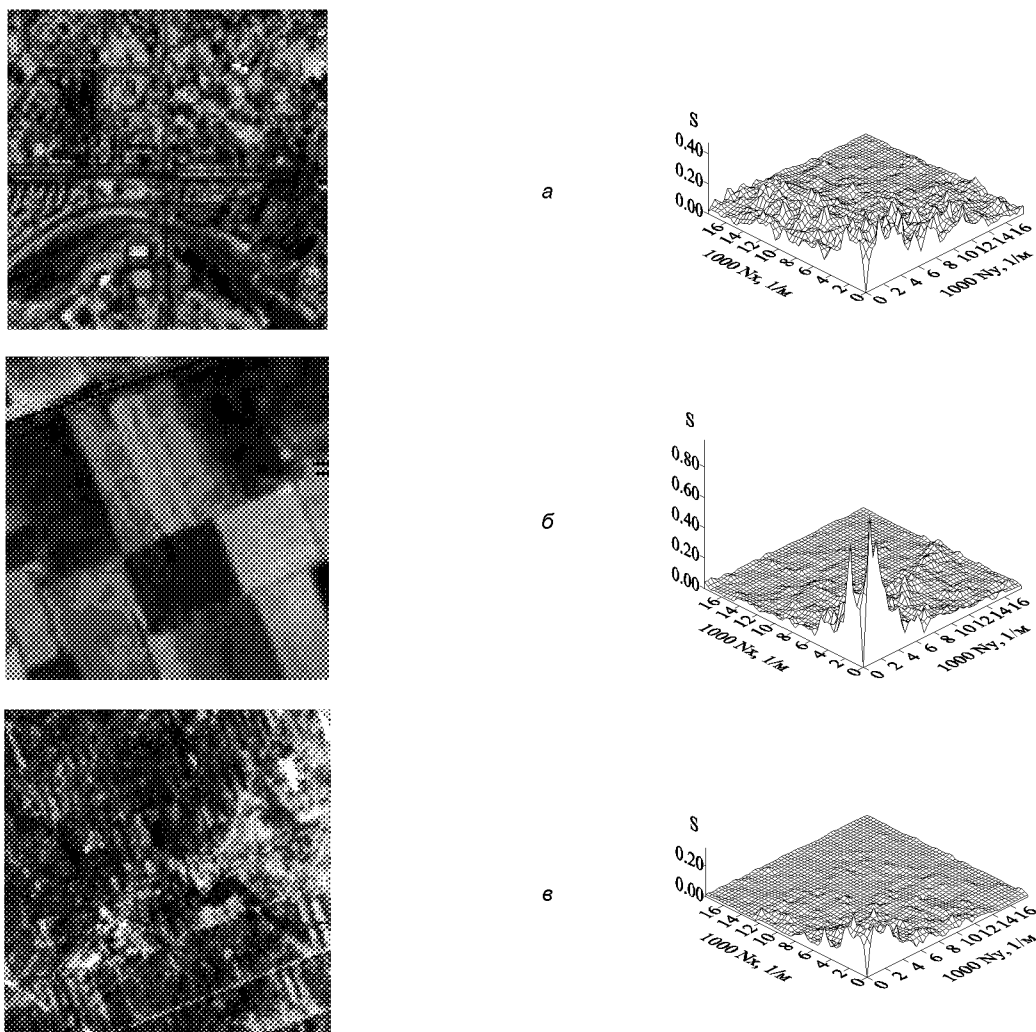


Рис. 1. Фрагменты космических снимков «Landsat» городской застройки (а), сельскохозяйственных полей (б) и участка леса (в) и их нормированные пространственные спектры

спектр Фурье. Программа позволяет задавать количество гармоник спектра, определять составляющие спектра, центрировать значения плотности фототона, а также выполнять другие операции с ПЧС. Для исключения влияния пространственной ориентации исследуемых фрагментов проводилось несколько циклов измерений и вычислений спектров по различным направлениям с последующим их усреднением и статистической оценкой вероятностных характеристик. Продолжением исследований является отбор информативных ПЧС признаков (отдельных спектральных диапазонов, их отношений и разностей) для последующего распознавания и классификация изображений ПЛ по типам.

На рис. 1 приведены фрагменты космических снимков «Landsat» городской застройки, сельско-

хозяйственных полей, участка леса и их нормированные пространственные спектры. Сравнение приведенных на рис. 1 распределений амплитуд спектров по пространственным частотам для изображений различных ПЛ позволяет обнаружить различия в соответствующих диапазонах пространственного спектра. Как следует из сравнения спектров наибольшие отличия находятся в диапазоне высоких частот от $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ и выше. В изображении спектра сельскохозяйственного поля (б) можно распознать отображение прямолинейных структур снимка в виде участка, вытянутого в сторону высоких частот. Форма этого спектра характеризует плавное изменение яркости с преобладанием низких частот пространственного периода от 200 м и более. Для участка леса (в) характерна асимметрия, выражен-

ная в расширении спектра вдоль оси X , что вызвано, по-видимому, ориентацией просек в одном направлении. Спектр городской застройки (a) содержит практически все частоты, соответствующие номинальному разрешению снимка (30 м) и размеру анализируемого участка.

Проведенные исследования показали реальную возможность использования ПЧС, особенно при частичной автоматизации процесса дешифрирования изображений ПЛ. Наиболее эффективны комплексные методы, позволяющие реализовать все доступные информационные характеристики, т. е. оптические спектральные признаки необходимо анализировать в совокупности с ПЧС признаками изображений зондируемых природных объектов [13, 22].

Распознавание ландшафтных структур во многом зависит от качества изображений, которое непосредственно связано с параметрами космических снимков. При дешифрировании последних должна обеспечиваться максимальная вероятность обнаружения морфологических признаков ландшафтных структур, совокупность которых позволит распознать элементы ландшафта, а затем с учетом наземных наблюдений определить тип ПЛ и оценить его геоэкологические параметры. Опыт дешифрирования изображений природных ландшафтов показывает, что не всегда лучший по разрешающей способности космический снимок является более информативным и обеспечивает высокую вероятность распознавания ландшафтных структур. В специальной литературе можно встретить выражения: «ландшафтное разрешение», «прозрачность», «рентгеноскопичность» снимков, а также уровень «генерализации» изображения [2, 4, 22]. Этими терминами подчеркивается то обстоятельство, что каждый масштабный уровень — мелкий ($1 : 10^6$ и мельче), средний ($1 : 2 \cdot 10^5$) и крупный ($1 : 70—125 \cdot 10^3$) являются информативными для ландшафтных структур определенного уровня, отличающихся не только по морфологии, но и по генезису. Так, например, на мелкомасштабных космических снимках фиксируются общие генерализованные черты геологического строения, на среднемасштабных — расчлененность рельефа и гидрографическая сеть, на крупномасштабных — элементы рельефа, растительность, параметры водных объектов и др. [2, 17, 22]. Это обстоятельство требует при выборе критерия оценки изображения в каждом конкретном случае учитывать не только физиономические, но и генетические информативные признаки ландшафтных структур соответствующего уровня.

С целью исследования корреляционных связей значений различных критериев с вероятностью рас-

познавания изображений ландшафтных структур и оценки эффективности программ тематической обработки реальных космических снимков были поставлены эксперименты, которые проводились в два этапа. На первом этапе было проведено физическое моделирование [26]. С помощью сканирующей оптической аппаратуры получались изображения физических моделей, имитирующих ПЛ. Преимущество физического моделирования заключается в возможности изменять в процессе эксперимента параметры сканирующей оптической системы в широком диапазоне (световой диаметр, коэффициент усиления и разрешающую способность) и яркостные характеристики моделей. Это позволило получить значения вероятности распознавания изображений моделей от 0 до 1, что сложно было бы реализовать на основе только космических изображений. В результате установлено, что наибольшую корреляцию с вероятностью распознавания (0.84) и удовлетворительную отрицательную корреляцию с вероятностью ложного распознавания ландшафтных структур (-0.68) имеет критерий μ_L , являющийся по своей физической сути логарифмической формой отношения сигнал/шум в пространственно-частотной области спектра [31]:

$$\mu_L = \int \int_G \log_2 \left\{ 1 + \frac{S_{с.вх.}(N_x, N_y) T^2(N_x, N_y)}{S_{ш.вых.}(N_x, N_y)} \right\} dN_x dN_y, \quad (4)$$

где $S_{с.вх.}(N_x, N_y)$ и $S_{ш.вых.}(N_x, N_y)$ — пространственно-частотные энергетические спектры входного сигнала и шума на выходе аппаратуры соответственно; $T(N_x, N_y)$ — результирующая функция передачи модуляции оптической сканирующей аппаратуры; N_x и N_y — пространственные частоты; G — область интегрирования в плоскости пространственных частот.

На втором этапе исследований производилось компьютерное моделирование процесса дешифрирования космических изображений. На основе реальных космических снимков участков рек: Днепр (спутник «Landsat»), Припять («Spot», «Landsat», «Ресурс») и Самара («Spot») создавались различного качества изображения устьевых зон рек, которые в последующем воспроизводились на мониторе компьютера. Моделирование космических изображений выполнялось с помощью программ «Fotoshop», «Erdas Imagine» и специально разработанной программы. Путем изменения контраста, яркости и резкости, а также применения пространственно-частотной фильтрации было смоделировано 60 изображений устьевых участков рек различного качества. Для всех изображений были рассчитаны значения критерия μ_L .

При расчете значения критерия по формуле (6) произведение $S_{\text{с.вх.}}(N_x, N_y)T^2(N_x, N_y)$ определялось для каждого снимка путем измерения энергетического ПЧС изображения устьевое участка реки непосредственно по космическому снимку, что фактически соответствовало ПЧС изображения с шумом $S_{\text{(с.+ш.)вх.}}(N_x, N_y)$. Значение $S_{\text{ш.вх.}}(N_x, N_y)$ определялось из допущения, что шум белый с нормальным распределением. В этом случае значение амплитуды спектра шума определялось по $S_{\text{(с.+ш.)вх.}}(N_x, N_y)$ на пространственной частоте N_R , соответствующей реальной разрешающей способности космического снимка. Методика определения N_R изложена в работе [24].

На рис. 2 в качестве примера приведено семейство сечений нормированных ПЧС, полученных для разного качества космических изображений одного и того же участка устья реки Припять, а также соответствующих им нормированные значения критерия μ_L . Видно, что с ухудшением качества космических изображений (уменьшение значений критерия μ_L) убывает высокочастотная область ПЧС изображений.

Дальнейший ход эксперимента заключался в дешифрировании полученных материалов группой из 12 операторов. Операторы, руководствуясь известными информативными признаками АНЛ, выставили баллы (1—10) качества исследуемых изображений устьевых зон. Вероятностные оценки качества P для каждого изображения определялись как отношение суммы выставленных 12 операторами баллов к максимально возможной сумме 120 баллов.

Значения критерия μ_L и вероятности P создают необходимые предпосылки для изучения корреляции между ними для всех исследованных изображений устьев рек Днепр, Припять и Самара. Значе-

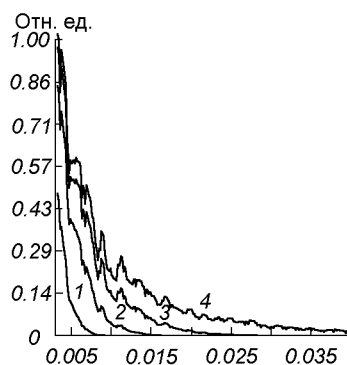


Рис. 2. Сечения нормированных ПЧС для разного качества космических изображений устьевой зоны реки Припять и соответствующие им нормированные значения критерия μ_L (1 — 0.13; 2 — 0.26; 3 — 0.77; 4 — 1.0)

ние коэффициента корреляции r между μ_L и P оказалось статистически значимым [9] и равным 0.87, что хорошо совпало с результатами физического моделирования (0.84).

Для оценки информативности разных оптических спектральных слоев космических снимков рассчитаны значения μ_L для изображений устьевой зоны рек Самары и Припяти в спектральных диапазонах 0.5—0.6; 0.6—0.7 и 0.7—0.8 мкм. Размеры анализируемых участков на местности для всех снимков выбирались равными, тем самым обеспечивался учет масштабов космических изображений. Результаты расчетов μ_L показали, что наиболее информативным для распознавания АНЛ является спектральный диапазон 0.7—0.9 мкм, а самое большое значение μ_L в этом спектральном диапазоне имеет снимок ИСЗ «Spot», что совпадает с данными, полученными на основе опыта многолетней практики дешифрирования [14, 29].

В процессе тематической обработки космических изображений участка устья Днепра была дана оценка эффективности программного продукта «Erdas Imagine». Процедура оценки заключалась в вычислении значений μ_L для прошедших различную тематическую обработку космических изображений. Были получены нормированные значения μ_L , характеризующие качество обработанных различными программами изображений: для исходного снимка — 1.0, после обработки программой «Luminance modification» — 1.4, «Speckle» — 0.6, «Wallis adaptive filter» — 1.54. Таким образом, наилучшие результаты дает обработка изображения по методике «Wallis adaptive filter», а методика «Speckle» значительно снизила качество исходного снимка. Результаты, полученные при визуальной оценке качества обработанных изображений, не противоречили оценкам, выполненным с помощью формализованной методики.

Ограниченный объем статьи не позволяет рассмотреть другие методы дешифрирования космических изображений ПЛ. В частности, не рассмотрены вопросы фильтрации как способа предварительного преобразования изображения с целью выделения или усиления информативности признаков, облегчающих последующее дешифрирование ПЛ. За рамками анализа осталось динамическое визуальное дешифрирование, которое предусматривает оперативное преобразование в интерактивном режиме космических изображений в реальном времени с помощью ЭВМ. Эти и другие вопросы планируется рассмотреть отдельно.

2. Востокова Е. А., Сушеня В. А., Шевченко Л. А. Экологическое картографирование на основе космической информации. — М.: Недра, 1988.—221 с.
3. Гейны С., Дубына Д. В., Сытник К. М. и др. Макрофиты — индикаторы изменений природной среды. — Киев: Наук. думка, 1993.—433 с.
4. Григорьев А. А. Космическая индикация ландшафтов Земли. — Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1975.—165 с.
5. Гродзинский М. Д. Основы ландшафтной экології. — Київ: Либідь, 1993.—220 с.
6. Гудмен Дж. Введение в Фурье оптику. — М.: Мир, 1970.—364 с.
7. Дьяченко Т. Н., Федоровский А. Д., Суханов К. Ю. К вопросу оценки экологического состояния Килийской дельты Дуная // Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон черного моря: Сб. науч. тр. — Севастополь, 1996.—С. 127—132.
8. Звенигородський Е. Л. Оцінка стану водних об'єктів з використанням експертно системи на базі нечітко логіки // Укр. географ. журн.—1998.—№4 (24).—С. 34—37.
9. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. — М.: Наука, 1973.—900 с.
10. Клоков В. М. Ценологическая характеристика водной растительности Килийской дельты Дуная // Высшие водные и прибрежноводные растения: Тез. докл. I Всесоюз. конф., Борок, 1977, 7—9 сент. — С. 39—43.
11. Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Новое в дистанционном зондировании окружающей среды // Исслед. Земли из космоса.—1996.—№ 1.—С. 107—121.
12. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. — М.: Радио и связь, 1982.— 432 с.
13. Кравцова В. И. Космические методы картографирования. — М.: Изд-во МГУ, 1995.—240 с.
14. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Жарый В. Ю. и др. Аэрокосмические методы в геоэкологии. — Киев: Наук. думка, 1992.—206 с.
15. Лялько В. И., Маринич О. М., Федоровський О. Д. Аерокосмічні дослідження ландшафтних комплексів України // Укр. географ. журн.—1994.—№ 4.—С. 3—8.
16. Лялько В. И., Федоровський А. Д., Сіренко Л. Я., Рябоконенко О. Д. та ін. Україна з космосу. Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів. — Киев: Додаток до журналу «Космічна наука і технологія».—1997.—3, № 3/4.—34 с.
17. Николаев В. И. Космическое ландшафтоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993.—81 с.
18. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.—328 с.
19. Поздняков Д. В., Кондратьев К. Я. Дистанционное зондирование природных вод в видимом диапазоне спектра. I. Формирование яркости водной поверхности // Исслед. Земли из космоса.—1997.—№ 1.—С. 3—21.
20. Поздняков Д. В., Кондратьев К. Я. Дистанционное зондирование природных вод в видимом диапазоне спектра. II. Пути решения обратных задач // Исслед. Земли из космоса.—1997.—№ 2.—С. 3—24.
21. Преображенский В. С., Александрова Т. Д., Куприянова Т. П. Основы ландшафтного анализа. — М.: Наука, 1988.—189 с.
22. Ревзон А. Л. Космическая фотосъемка в транспортном строительстве. — М: Транспорт, 1993.—272 с.
23. Федоровский А. Д., Гриневецкий В. Т., Косточенко Ю. В., Кувшинов А. Ю. Ландшафтоведческий подход при дешифрировании космических снимков // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 39—45.
24. Федоровский А. Д., Кононов В. И., Суханов К. Ю. Обоснование методики внешнего контроля оптической аппаратуры дистанционного зондирования земной поверхности // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 3/4.—С. 50—53.
25. Федоровский А. Д., Сиренко Л. А., Звенигородский Э. Л. и др. Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 5/6.—С. 103—106.
26. Федоровский Ф. Д., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 24—31.
27. Харалик Р. М. Статистический и структурный подход к описанию текстур. — М.: Мир, 1979.—67, №5.—С. 98—120.
28. Януш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М: Недра, 1991.—240 с.
29. Bukata R. P., Jerome J. H., Kondratyev K. Ya. et al. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. Boca Raton etc.: CRC Press.—1995.—365 p.
30. Fedorovsky A. D., Suhanov K. Yu., Yakimchuk V. G. The estimation of ecological condition of natural water systems with use of system approach / International Archives of Photogrammetry and Remote Sensung. Vol. XXXII, Part 7, Budapest, 1998.—P. 706—707.
31. Jones C. Information Capacity of Photographic Films // J. Opt. Soc. America.—1961.—51, N 11.—P. 1159—1171.

ON THE INTERPRETATION OF SPACE IMAGES OF NATURAL LANDSCAPES

A. D. Fedorovsky

Methodological problems of the interpretation of space images of natural landscapes on the basis of landscape system approach and complex use of optical spectral and space-frequency information attributes are considered. Criteria for evaluating and choosing space images for the interpretation of landscape structures are investigated.