

УДК.528.553.98

К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов

А. Д. Федоровский, К. Ю. Суханов, В. Г. Якимчук

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАНУ, Київ

Надійшла до редакції 19.10.98

Досліджується можливість оцінки та вибору космічних знімків для розв'язання завдань землекористування на основі критеріїв, які пов'язані з імовірністю дешифрування зображень ландшафтних структур. Описано процедуру фізичного моделювання та досліджено кореляційні зв'язки між формалізованими критеріями якості та імовірностями розпізнавання та хибного розпізнавання зображень моделей елементів ландшафтів. Наведено результати порівняльної оцінки космічних зображень ділянок Чорнобильсько-Лютізького полігону, отриманих різними супутниковими системами дистанційного зондування Землі.

Требования к параметрам космических снимков земной поверхности и методикам их дешифрирования определяются на основании конкретных природоохозяйственных и природоохранных задач. Так, например, для выявления зон локализации глубинных и региональных тектонических разломов наиболее информативными оказываются мелкомасштабные космические снимки (1:10⁶ и мельче), когда в результате естественной оптической генерализации роль мелких деталей рельефа и почвенно-растительного покрова как маскирующего фактора снижается настолько, что через косвенные признаки наиболее отчетливо проявляются элементы глубинного строения земной коры [16]. При дешифрировании среднемасштабных космических изображений (1 : 200 000) становится возможным анализ экзогенных форм рельефа, которые связаны с литологическими особенностями горных пород и их гидрогеологическими условиями. Для решения задач землепользования используются крупномасштабные снимки (1 : 70—125 000), анализ которых осуществляется на фитоэкзоморфогенном уровне с использованием ландшафтного подхода. Последний позволяет значительно расширить круг исследований, в том числе, изучение морфодинамики релье-

фа, установление глубин залегания грунтовых вод, оценка результатов антропогенного воздействия и др.

Комплексные задачи геофизики, геоэкологии, гидрологии и другие решаются на основе космических снимков различных масштабных диапазонов. При этом на каждом масштабном уровне используются свои физиономические информативные признаки объектов, которые различаются не только по морфологии, но и по генезису. В этом случае анализ космической информации представляет собой иерархический многоуровневый процесс.

Для конкретных задач наиболее информативными могут оказаться космические снимки какого-то одного из перечисленных масштабов. Оценка и анализ таких изображений имеют свои специфические особенности [16].

Цель данной работы заключается в исследовании возможности объективной оценки крупномасштабных космических изображений с точки зрения эффективности их использования для распознавания ландшафтных структур и классификации природных ландшафтов.

Согласно определению [15] ландшафтом считается достаточно сложный географический комп-

лекс, обычно состоящий из многих элементарных физико-географических единиц, тесно связанных между собой. Последние изображаются на космическом снимке пространственными структурами, которые индицируются как по спектральным (оптическим), так и по текстурным признакам. Выявленные на космических снимках ландшафтные структуры: гидрографические (эрозионная сеть, озера, болота, выходы грунтовых вод), геологические (сеть линейных элементов и локальные неотектонические нарушения), почвенные (яркостные различия, связанные с вариациями механического и минерального состава, а также увлажненности и засоленности почв), геоботанические (состав и распределение растительности) и антропогенные становятся теми составляющими, с помощью которых определяется геоэкологический тип природного ландшафта и природное устройство региона более высокого ранга. Анализ структур позволяет судить о трудно распознаваемых явлениях, делает возможным обнаружить экзодинамические процессы и физико-географические особенности, которые не поддаются непосредственному выявлению. Основанием для такого подхода служат установленные в результате многолетних исследований взаимосвязи между типами ландшафтных комплексов и различными геоэкологическими характеристиками природной среды [4]. Такого рода исследования строятся на базе совокупности данных наземных и дистанционных измерений, формировании многомерных моделей ландшафтных комплексов в рамках теории нечетких множеств и установления корреляционных зависимостей геоэкологических характеристик от структурно-функциональных особенностей природных ландшафтов.

Распознавание внутренней морфологической структуры природных ландшафтов по крупномасштабным космическим снимкам во многом зависит от качества изображения, которое непосредственно связано с параметрами аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), условиями съемки, а также методами обработки космических снимков. При дешифрировании последних должна обеспечиваться максимальная вероятность распознавания физико-географических признаков, совокупность которых позволит определить тип ландшафта.

Современный рынок космических снимков и программного обеспечения для их тематической обработки предлагает достаточно широкий набор своей продукции. Очевидно, что со временем этот ассортимент будет только расширяться. Естественно, у ландшафтоведов возникнет вопрос: какому из многочисленных космических изображений, полученных разной космической аппаратурой, а главное —

какому программному продукту следует отдать предпочтение для дешифрирования природных ландшафтов. В связи с этим представляется актуальной задачей разработка методики, позволяющей объективно оценивать с точки зрения указанных выше требований качество космических изображений, а также эффективность различных методов и программ их обработки.

Такая оценка должна производиться с помощью критерия, выбор которого основан на установлении корреляционных связей значений последнего с вероятностью распознавания ландшафтных структур. Искомый критерий определяется по максимальному значению коэффициента корреляции. При наличии корреляционной связи между критерием и вероятностью распознавания их зависимость может быть аппроксимирована уравнением регрессии. Полученная параметрическая зависимость позволит по вычисленному значению критерия прогнозировать вероятность распознавания ландшафтных структур. Коэффициенты линии регрессии определяются по статистическим параметрам выборок значений критерия и вероятностям распознавания.

Известны различные критерии, предназначенные для оценки оптических систем по качеству изображений [9, 10, 20, 21]. Одним из традиционных критериев, характеризующих качество изображений, является линейная разрешающая способность b_k на исследуемой земной поверхности, которой соответствует минимальный элемент разрешения изображения, например пиксел цифрового космического снимка. Однако при проведении дешифрирования ландшафтных структур было замечено, что не всегда лучший по разрешению снимок обеспечивал более высокий уровень распознаваемости элементов ландшафтных структур и достоверную их классификацию. Как показал многолетний опыт применения этого критерия, существенным недостатком этой характеристики является отсутствие однозначной связи с вероятностью дешифрирования изображений, полученных разными оптическими системами [2]. Для сравнения космических изображений с одинаковыми перепадами максимальной L_{\max} и минимальной L_{\min} яркости используется критерий «пограничный градиент» G_L — тангенс угла наклона касательной в средней точке пограничной кривой к оси абсцисс [10]. В работе [14] показано, что чем более контрастно изображение различных морфологических единиц, тем увереннее дешифрируется природный ландшафт в целом. Величина k_L учитывает как «пограничный градиент», так и контраст изображения:

$$k_L = G_L(L_{\max} - L_{\min})/L_{\max}. \quad (1)$$

Применение теории линейных цепей и преобразования Фурье к анализу оптических изображений привело к понятию передаточной функции оптических систем. В связи с этим основной характеристикой для оценки сложных оптико-электронных систем построения изображений стала оптическая передаточная функция (ОПФ), показывающая, с какими искажениями по амплитуде и фазе передает оптическая система сигналы синусоидальной формы различных пространственных частот [5]. Модуль ОПФ является пространственной амплитудно-частотной характеристикой и носит наименование функции передачи модуляции (ФПМ), которая характеризует зависимость изменения амплитуды выходного сигнала от пространственной частоты. На основе ФПМ были предложены несколько числовых критериев для оценки качества оптических систем, например, критерий Шаде (N_e), характеризующий эквивалентную полосу пропускания с постоянной амплитудой сигнала; критерии, основанные на измерении площади, ограниченной значениями ФПМ в сюжетно важном интервале пространственных частот [23], а также некоторые другие критерии. В работах [11, 13, 22], посвященных вопросам выделения сигналов на фоне шумов, показано, что в ситуации, когда характеристики регистрируемых сигналов известны, лучшим является изображение, полученное аппаратурой, обеспечивающей большее значение отношения амплитуды сигнала к среднему квадратичному значению шума или отношения мощности сигнала и шума на выходе системы (μ). В работе [1] приводится выражение, представляющее собой интегральное отношение сигнал/шум в пространственно-частотной области спектра:

$$\mu_S = \iint_G \frac{S_{с.вх.}(N_x, N_y)T^2(N_x, N_y)}{S_{ш.вых.}(N_x, N_y)} dN_x dN_y, \quad (2)$$

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

Аналогичная формула использовалась в качестве критерия эффективности оптических сканирующих систем ДЗЗ, работающих в ИК-области спектра [17]. В эксперименте [18] была установлена высокая корреляция интегрального отношения сигнал/шум с вероятностью обнаружения порядка 0.9 при дешифрировании изображений температурных аномалий на водной поверхности.

Известно выражение [24], которое является по

своей физической сути логарифмической формой отношения сигнала к шуму в пространственно-частотной области спектра:

$$\mu_L = \iint_G \log_2 \left\{ 1 + \frac{S_{с.вх.}(N_x, N_y)T^2(N_x, N_y)}{S_{ш.вых.}(N_x, N_y)} \right\} dN_x dN_y, \quad (3)$$

Сформированный на основе модифицированного выражения (3) информационный критерий и модель входного сигнала подробно рассмотрены в работах [8, 9] и предложены для оценки иконических систем, регистрирующих объекты сложной формы и малого контраста.

Следует отметить, что приведенные в работах [9, 11, 22] аналитические и экспериментальные зависимости вероятности обнаружения и распознавания от значений различных критериальных величин получены при дешифрировании изображений объектов простой формы, а также различной военной техники (автотранспорта, танков, самолетов и др.). Аналогичных исследований применительно к дешифрированию изображений природных ландшафтов, как нам известно, не проводилось.

Целесообразность использования того или иного критерия не может быть в достаточной мере обоснована путем только теоретического рассмотрения. Визуальное дешифрирование представляет собой сложный информационно-логический процесс, включающий смысловое восприятие, мышление, пространственное представление, т. е. требует участия специалиста высокой квалификации. Поэтому вопрос о выборе критерия необходимо решать на основе экспериментального дешифрирования многих изображений различного качества с участием операторов-дешифровщиков. Проведение таких исследований в реальных условиях сопряжено с большими организационными и техническими трудностями. В связи с этим была разработана методика физического моделирования в лабораторных условиях процесса получения изображений ландшафтных структур, их дешифрирования, оценки вероятности распознавания (P_p), вычисления значений критериев и определения корреляционных связей последних с P_p .

Экспериментальная установка состояла из сканирующего оптико-электронного прибора, предназначенного для дистанционного зондирования земной поверхности в ИК-диапазоне спектра, набора моделей, имитирующих морфометрические и оптические характеристики ландшафтных структур, а также регистрирующего устройства, на котором отображались и документировались изображения моделей. Конструкция установки позволяла получать изображения, соответствующие реальным мас-

штабам исследуемых объектов и изменять в широких пределах основные параметры аппаратуры: световой диаметр ($D = 3 \dots 8$ см) и мгновенный угол поля зрения ($\delta = 0.025 \dots 0.07$ рад.). Всего таким образом было сформировано семь вариантов аппаратуры ДЗЗ. Диапазоны варьирования параметров аппаратуры и моделей выбирались так, чтобы обеспечить в процессе опытов изменение значений вероятности обнаружения изображений моделей от 0 до 1.

При создании моделей были использованы геометрические фигуры и их комбинации, пространственно-частотные спектры (ПЧС) которых соответствовали спектрам изображений реальных ландшафтов. Выбор моделей на основе анализа ПЧС представляется обоснованным, так как последние характеризуют структуру и текстуру изображений. В результате было отобрано девять фигур, комбинации которых использовались в качестве имитационных моделей. Размеры отдельных деталей моделей выбирались таким образом, чтобы мелкие детали были соизмеримы с минимальным значением мгновенного поля зрения сканирующей аппаратуры.

На рис. 1 и 2 представлены фрагменты космических изображений участка лесного массива (рис. 1, *a*) и поймы реки (рис. 2, *a*), а также имитирующие их модели (рис. 1, *б* и 2, *б*). Соответствующие им нормированные пространственно-частотные спектры Фурье, приведенные в плоскость предмета, изображены на рис. 1, *в—г* и рис. 2, *в—г*.

Яркостные характеристики исследуемых объектов имитировались изменением энергетической яркости моделей в ИК-диапазоне оптического спектра путем подогрева моделей и регулирования температурного контраста между моделью и фоном. При этом значение приращения интенсивности излучения ΔF , регистрируемое аппаратурой, вычислялось по формуле [17]:

$$\Delta F = 4 \cdot 10^{-12} t^3 \Delta t \delta^2 \tau D^2 (\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}} \quad (4)$$

где Δt — температурный контраст между моделью и фоном; t — температура модели (К); D — световой диаметр объектива аппаратуры; δ — мгновенный угол поля зрения аппаратуры; τ — коэффициент суммарного ослабления потока излучения; $(\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}}$ — относительная спектральная ширина полосы пропускания приемника излучения.

Получение малых температурных перепадов в лабораторных условиях представляет определенные трудности. Поэтому подбором нейтральных ИК-фильтров моделировались реальные яркостные контрасты, представляющие практический интерес.

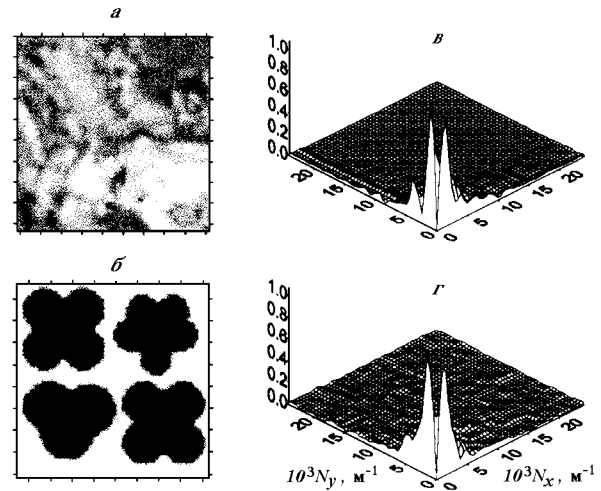


Рис. 1. Фрагмент космического изображения лесного массива (*a*), изображение модели, имитирующей участок леса (*б*), нормированные пространственно-частотные спектры изображений: леса (*в*) и модели (*г*), приведенные к земной поверхности (на горизонтальных осях — значения $N \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$)

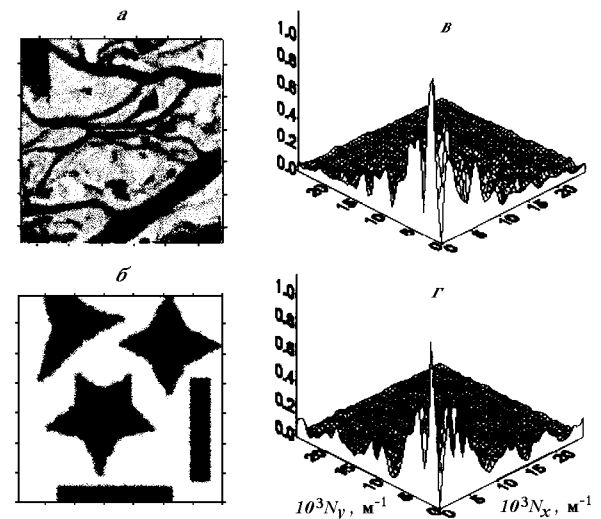


Рис. 2. Фрагмент космического изображения поймы реки (*a*); изображение модели, имитирующей участок поймы реки (*б*); нормированные пространственно-частотные спектры изображений: поймы реки (*в*) и модели (*г*), приведенные к земной поверхности

Энергетическая контрастная яркость моделей и фона рассчитывались по соответствующим таблицам [3] для каждого температурного контраста от 0.1 до 0.5 °С. Так было сформировано 45 вариантов моделей входного сигнала.

В соответствии с принятой методикой были вычислены значения критериальных величин $R = 1/2b_k, \mu, \mu_S$ и μ_L для всех исследуемых вариантов

аппаратуры и параметров моделей сигнала. При вычислении по формулам (2) и (3) было сделано ряд допущений. В качестве $S_{с.вх.}(N_x, N_y)$ использовались умноженные на ΔF^2 нормированные пространственно-частотные спектры исследуемых имитационных моделей. При вычислении величины μ величина сигнала определялась с помощью выражения (4). Так как шум на выходе сканирующей ИК-аппаратуры в основном определяется шумами приемника излучения [13], то значение шума принималось равным квадрату мощности шума приемника излучения.

Известно [1], что пространственно-частотный анализ применим только для линейных звеньев аппаратуры ДЗЗ. Это условие выполняется, так как в изображении ландшафтов преобладают малоконтрастные структуры.

Дальнейший ход эксперимента заключался в получении изображений последовательно выбираемых моделей для каждого температурного контраста. Всем полученным изображениям присваивался номер, по которому в дальнейшем можно было определить вид модели, ее температурный контраст, а также вариант аппаратуры, с помощью которой было получено изображение. При проведении исследований учитывалось, что могут быть факторы, влияющие на результаты анализа интересующих зависимостей (температура окружающей среды, конвекционные воздушные потоки и др.). В связи с этим план эксперимента был составлен таким образом, чтобы рандомизировать факторы, трудно поддающиеся учету и контролю. При этом их можно рассматривать как случайные величины, и следовательно, учитывать статистически.

Дешифрирование полученных материалов проводилось 16 операторами различной квалификации, предварительно ознакомленными с изображениями моделей. Задачей операторов являлось обнаружение моделей и определение их принадлежности к одному из видов. Вероятности распознавания моделей P_p и ложного распознавания ($P_{лр}$) определялись по частоте соответствующих ответов. Частота правильных ответов (или ошибочных) представляла собой среднее арифметическое значение, определяемое как отношение числа правильных ответов (или ошибочных) к общему числу ответов. Статистической обработке были подвергнуты результаты дешифрирования операторами изображений, полученных с помощью семи вариантов оптических систем и девяти моделей, имевших пять градаций температуры в диапазоне 0.1—0.5 °С, что составило 315 изображений.

В результате были получены оценки вероятностей P_p и $P_{лр}$ для всех моделей и вариантов аппара-

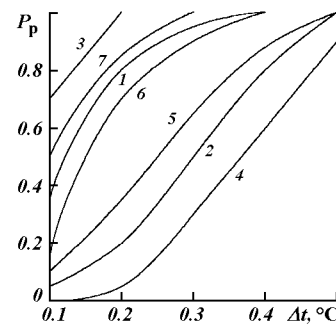


Рис. 3. Зависимости вероятности распознавания изображений одной из исследуемых моделей от температурного контраста между моделью и фоном (для семи вариантов аппаратуры)

туры при разных температурных контрастах между моделью и фоном. Построенные на основе полученных данных зависимости вероятностей P_p и $P_{лр}$ от температурного контраста имели монотонно возрастающий характер, что свидетельствует о правильности проведения эксперимента. На рис. 3 приведено семейство вероятностных характеристик P_p одной из моделей для всех семи вариантов аппаратуры.

Вычисленные значения критериев R , μ , μ_s , μ_L и полученные вероятности P_p и $P_{лр}$ создают необходимые предпосылки для определения критерия, имеющего максимальную корреляцию с вероятностью распознавания. Для его определения необходимо вычислить значения коэффициента корреляции r между величинами R , μ , μ_s , μ_L и вероятностями P_p и $P_{лр}$ применительно ко всем видам моделей и вариантам аппаратуры по формуле:

$$r = \frac{\sum P_i M_i - n \bar{P} \bar{M}}{\sqrt{(\sum P_i^2 - n \bar{P}^2) (\sum M_i^2 - n \bar{M}^2)}} , \quad (5)$$

где P_i — текущие значения вероятности P_p или $P_{лр}$; M_i — текущие значения R , μ , μ_s , μ_L ; $i = 1 \dots n$; $n = 315$; \bar{P} и \bar{M} — средние значения. Вычисленные коэффициенты корреляции приведены в табл. 1.

Поскольку данные, приведенные в таблице, получены на сравнительно ограниченном экспериментальном материале, для подтверждения корреляционной зависимости необходимо показать, что значения r не равны нулю.

Учитывая, что распределение r медленно сходится к нормальному эту операцию можно выполнить с использованием функции U (6) путем проверки гипотезы о равенстве нулю выборочных коэффици-

Таблица 1. Значения коэффициента r

Вероятность	R	μ	μ_S	μ_L
P_p	0.30	0.71	0.75	0.84
$P_{л}$	-0.12	-0.50	-0.65	-0.68

Таблица 2. Значения функции U

Вероятность	R	μ	μ_S	μ_L
P_p	5.5	15.7	17.2	21.6
$P_{л}$	2.1	9.7	13.7	14.6

ентов корреляции r для количества опытов $n = 315$ [6].

$$U = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}. \quad (6)$$

Отсутствие статистически значимой корреляционной зависимости обнаруживается в случае, когда значения функции U попадают в интервал $-Z_{\alpha/2} \leq U < Z_{\alpha/2}$. Границы интервала равны соответственно -2.24 и $+2.24$ при $\alpha = 0.025$. Вычисленные по формуле (6) значения U для P_p и $P_{л}$ и соответствующих критериальных величин приведены в табл. 2.

Таблица подтверждает наличие статистически значимой корреляционной зависимости между значениями P_p и всеми критериальными величинами, а также между значениями $P_{л}$ и величинами μ , μ_S и μ_L .

На основании данных табл. 1 и 2 можно сделать вывод, что для оценки информативности космических снимков, предназначенных для распознавания ландшафтных структур, может быть рекомендована критериальная величина μ_L , имеющая наибольшую корреляцию с вероятностью распознавания изображений моделей ландшафтных структур.

Уравнение прямой регрессии значений вероятности P_p от значений величины μ_L имеет вид

$$(\mu_L - \bar{\mu}_L) \beta(P_p) = r(P_p - \bar{P}_p) \beta(\mu_L), \quad (7)$$

где

$$\beta^2(P_p) = \sum (P_{pi} - \bar{P}_p)^2 / (n - 1);$$

$$\beta^2(\mu_L) = \sum (\mu_{Li} - \bar{\mu}_L)^2 / (n - 1);$$

$$\bar{P}_p = \sum P_{pi} / n; \quad \bar{\mu}_L = \sum \mu_{Li} / n;$$

P_{pi} и μ_{Li} — i -е отсчеты значений P_p и μ_L .

Определив значение μ_L , для исследуемого участка космического изображения, можно с помощью уравнения (7) прогнозировать вероятность дешифри-

рования элементов ландшафтных структур и ландшафтного комплекса в целом.

Результаты физического моделирования были апробированы при оценке космических снимков одного и того же участка Дымерского лесного массива Чернобыльско-Лютетжского полигона, которые были получены в одно время года разными сканирующими оптическими системами ДЗЗ спутников: «Природа» (18.05.94), «Ландсат» (29.05.88), «Спот» (18.04.94) и IRS (20.05.97).

Для указанных снимков были рассчитаны значения величины μ_L , а также для сравнения — значения N_e , k_L и $J_S = S_{с.вых.}^*(N_x, N_y)$. Последняя является интегралом энергетического пространственно-частотного спектра изображения ландшафта, центрированного относительно среднего значения плотности фототона, и учитывает как шумы, так и ФПМ аппаратуры.

При расчете значений μ_L (3) в качестве величины $S_{с.вых.}(N_x, N_y)$ использовался усредненный энергетический ПЧС изображения лесного массива. Спектр был получен с оцифрованного аэрофотоснимка того же участка, что и космические снимки (участка Дымерского лесного массива). Величина $S_{ш.вых.}(N_x, N_y)$ определялась с помощью выражения для равномерного энергетического спектра: $S_{ш.вых.}(N_x, N_y) = \sigma^2 Q$, где σ^2 — дисперсия шума, а Q — площадь сканирующей апертуры оптической системы [24]. Для определения ФПМ был применен метод, основанный на измерении пограничной кривой. Методика вычисления $T(N_x, N_y)$ по пограничной кривой с использованием космического снимка подробно описана в работах [9, 19]. В соответствии с этой методикой пограничные кривые определялись по границам переходов между зонами, имеющими наибольший контраст в пределах каждого снимка (берег—водоем, пашня—луг и др.). Вычисленные по пограничным кривым ФПМ для различных космических систем и нормированный ПЧС изображения лесного массива представлены на рис. 4. При вычислении значений критериальных величин размеры анализируемых участков на местности для всех снимков выбирались равными, тем самым обеспечивался учет масштабов космических изображений.

Определение значений μ_L , k_L , N_e и J_S реализовано в виде программного пакета KRITERY, включающего модули FPM и FOURJE. С помощью программы FPM по космическим изображениям в цифровой форме производилось построение пограничных кривых. Программа позволяет в интерактивном режиме производить просмотр изображения, изменять его масштаб на мониторе, задавать координаты

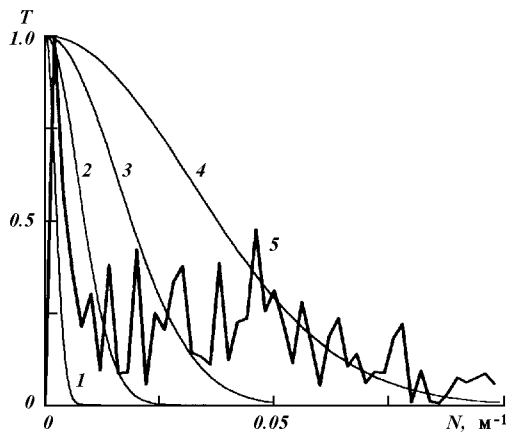


Рис. 4. Функции передачи модуляции для различных сканирующих систем дистанционного зондирования космических аппаратов: 1 — МСУ-СК, 2 — «Ландсат», 3 — «Спот», 4 — IRS; 5 — сечение нормированного пространственно-частотного спектра аэрофотоснимка участка леса

точек пограничных кривых, определять в этих точках значения плотности фототона и фиксировать их в файле. Вычисление спектров Фурье производилось с помощью программы FOURJE, позволяющей выделить на снимке, отображаемом на дисплее, фрагмент размером $A \times B$ пиксел и вычислить для него двухмерный пространственный спектр Фурье как для отдельных спектральных каналов, так и для синтезированного изображения. Программа позволяет задавать количество гармоник спектра, определять составляющие спектра и, при необходимости, центрировать значения плотности фототона, т. е. исключать постоянную составляющую. Результатом работы программы является текстовый файл, в котором записаны пространственные частоты N_x , N_y и соответствующие им значения составляющих спектра.

Таким образом были рассчитаны значения μ_L , k_L , N_e , J_S ; их нормированные значения приведены в табл. 3.

По данным таблицы построен рис. 5, который позволяет сопоставить нормированные значения μ_L с нормированными значениями k_L , N_e , J_S и R . Видно, что для значений J_S взаимосвязь с μ_L в большей степени линейна, чем для k_L , N_e и R .

Известно [14], что информативность изображения одного и того же участка земной поверхности зависит от спектрального диапазона космического снимка. Задача состоит в определении спектральной зоны, где обеспечивается наиболее успешное распознавание ландшафтных структур. Для оценки информативности разных спектральных слоев ис-

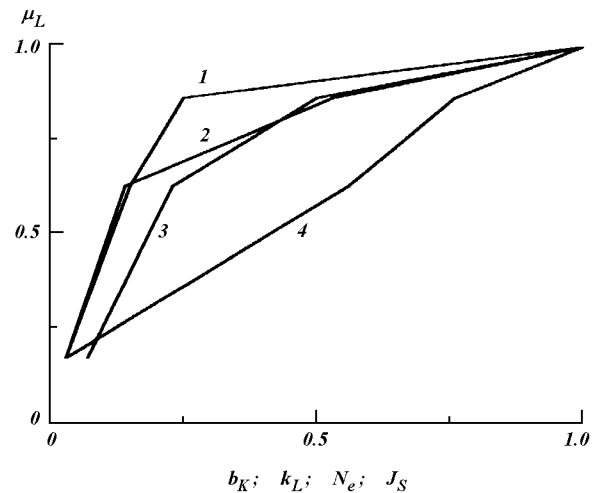


Рис. 5. Сопоставление нормированных значений критерия μ_L с нормированными значениями критериев: 1 — b_k , 2 — k_L , 3 — N_e , 4 — J_S

Таблица 3. Нормированные значения величин μ_L , R , N_e , k_L и J_S

ИСЗ	b_k , м	μ_L	R	N_e	k_L	J_S
IRS	5.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
«Спот»	20	0.86	0.25	0.50	0.53	0.76
«Ландсат»	30	0.63	0.15	0.23	0.14	0.56
МСУ-СК	165	0.17	0.03	0.07	0.03	0.13

Таблица 4. Нормированные значения величин μ_L и J_S для разных спектральных диапазонов

Величина	λ , мкм	МСУ-СК	«Landsat»	«Spot»
μ_L	0.5—0.6	10^{-4}	0.34	0.73
	0.6—0.7	10^{-3}	0.51	0.98
	0.7—0.9	10^{-2}	0.58	1.0
J_S	0.5—0.6	10^{-2}	0.15	0.46
	0.6—0.7	$3.4 \cdot 10^{-2}$	0.53	1.0
	0.7—0.9	$4.2 \cdot 10^{-2}$	0.60	0.96

следуемых космических изображений (МСУ-СК, «Ландсат», «Спот») были выполнены соответствующие измерения и рассчитаны значения μ_L и J_S в спектральных диапазонах $\lambda\lambda$ 0.5—0.6, 0.6—0.7 и 0.7—0.8 мкм для выбранных участков лесного массива. Результаты вычислений, нормированные для каждого критерия по максимальному значению для всех снимков, приведены в табл. 4.

Из табл. 3 и 4 видно, во-первых, практическое соответствие оценок космических изображений по критериям μ_L и J_S , во-вторых, более качественны-

ми космическими изображениями для распознавания ландшафтных структур являются снимки ИСЗ IRS и «Спот», а наиболее информативными спектральными диапазонами $\lambda\lambda$ 0.6—0.7 и 0.7—0.9 мкм, что подтверждается многолетней практикой [7, 12].

Рассмотренный выше пример оценки реальных космических изображений получен на ограниченном экспериментальном материале, и его следует рассматривать как иллюстрацию применения результатов физического моделирования. Приобретенный в процессе эксперимента опыт может быть методологической основой для продолжения исследований корреляционных связей критериальных величин с вероятностью распознавания и оценки эффективности программ тематической обработки снимков, но уже на новом уровне — компьютерном моделировании изображений природных ландшафтов на основе реальных космических снимков.

1. Алексеев В. И. Авиационная техника и светотехника. — М.: Изд-во ВВИА им. Жуковского, 1963.—334 с.
2. Березин Н. П., Кононов В. И. Разрешающая способность: история, состояние и развитие // Опτικο-мех. пром-сть.—1991.—№ 11.—С. 33—38.
3. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. — М.: Наука, 1965.—223 с.
4. Востокова Е. А., Суцены В. А., Шевченко Л. А. Экологическое картографирование на основе космической информации. — М.: Недра, 1988.—221 с.
5. Гудмен Дж. Введение в Фурье оптику. — М.: Мир, 1970.—364 с.
6. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. — М.: Наука, 1973.—900 с.
7. Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Новое в дистанционном зондировании окружающей среды // Исслед. Земли из космоса.—1996.—№ 1.—С. 107—121.
8. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. — Киев: Техніка, 1981.—134 с.
9. Кононов В. И. Связь информационных и вероятностных оценок систем формирования изображений (иконических систем) // Опτικο-мех. пром-сть.—1991.—№ 11.—С. 13—18.
10. Креопалова Г. В., Пуряев Д. Т. Исследование и контроль оптических систем. — М.: Машиностроение, 1978.—221 с.

11. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.—413 с.
12. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Жарый В. Ю. и др. Аэрокосмические методы в геоэкологии. — Киев: Наук. думка, 1992.—206 с.
13. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.—695 с.
14. Николаев В. И. Космическое ландшафтоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993.—81 с.
15. Преображенский В. С., Александрова Т. Д., Куприянова Т. П. Основы ландшафтного анализа. — М.: Наука, 1988.—189 с.
16. Ревзон А. Л. Космическая фотосъемка в транспортном строительстве. — М.: Транспорт, 1993.—272 с.
17. Федоровский А. Д. Оптические методы в гидромеханике. — Киев: Наук. думка, 1984.—174 с.
18. Федоровский А. Д. Критерий выбора тепловизионной системы для исследования поверхности моря // Морской гидрофиз. журн.—1995.—№ 4.—С. 78—80.
19. 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.
20. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. — М.: Мир, 1978.—670 с.
21. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. — М.: Сов. радио, 1967.—347 с.
22. Шаде О. Г. Оценка качества оптического изображения. — М.: Геодизиздат, 1959.—274 с.
23. Heynacher E. Uber die Bedeutung der Kontrastwiedergabe photographischer Objektiv // Kino-Technik.—1964.—N 17.—S. 159—164.
24. Jones C. Information capacity of photographic films // J. Opt. Soc. America.—1961.—51, N 11.—P. 1159—1171.

SELECTION AND ASSESSMENT OF SPACE IMAGES FOR THE INTERPRETATION OF LANDSCAPES STRUCTURES

A. D. Fedorovskyi, K. Yu. Sukhanov, and V. G. Yakimchuk

We discuss the selection and assessment of space images for solving the problems of land from interpretation landscape structure images. A procedure of physical modeling is described, and correlations between formalized criteria of quality and probabilities of recognition and false classification of the images of landscape element models are investigated. We present some results of the comparison of the space images of sites in the Chernobyl-Lutezh region acquired by various satellites of the Earth Remote Sensing system.