

Н.И. Аржененко, В.Г. Бондур

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЛАЧНЫХ ФОРМ ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СПЕКТРАМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Проведена оптико-цифровая обработка космических изображений, в результате которой получены информативные признаки для количественного анализа двумерных пространственных спектров (ПС) различных облачных форм.

Описаны типовые формы двумерных ПС изображений облачности. Проведен анализ статистической разделимости облачности различных групп по критерию максимума евклидова расстояния в пятимерном пространстве информативных признаков ПС.

### 1. Введение

Для решения ряда задач в таких областях, как распространение оптического излучения в атмосфере, теория климата, интерпретация данных дистанционного зондирования Земли, требуются глобальные исследования структуры облачных полей. Основным источником данных о характеристиках облачности являются изображения, получаемые из космоса.

Для обработки таких изображений, характеризующихся высокой информационной емкостью, целесообразно использовать оптико-цифровые методы [1–3]. Эти методы позволяют анализировать и классифицировать облачные поля по информативным признакам, основанным на измерении двумерных пространственных спектров (ПС). Обобщение информативных признаков ПС различных видов и форм облачности целесообразно проводить в виде выборочных условных вероятностных моделей

$P\{\bar{x}/W_0\}$ , где  $\bar{x}$  — вектор информативных признаков ПС,  $W_0$  — факторы условий, для которых сформирована выборочная вероятностная модель. В состав факторов условий  $W$  входят геометрические условия наблюдения (углы визирования, высота носителя и т. д.), условия освещения (зенитный угол и азимут Солнца в системе координат изображения), параметры аппаратуры, формирующей изображение (размер поля зрения, разрешение на местности, рабочий диапазон длин волн и т. д.), и другие параметры, влияющие на текстуру изображения.

В настоящей работе приведены результаты оптико-цифровой обработки фотоизображений облачности, классификация форм двумерных пространственных спектров (ПС) и оценка статистической разделимости облачных групп по информативным признакам двумерных ПС.

### 2. Результаты оптико-цифровой обработки фотоизображений облачности

На рис. 1 приведены в качестве примеров фрагменты фотоизображений облачности, полученные с борта орбитальных станций «Салют-6» и «Салют-7» и соответствующие им двумерные пространственные спектры. Обработка изображений проводилась на оптико-цифровом процессоре, описанном в [1]. Размер анализируемых участков подстилающей поверхности составлял  $96 \times 96 \text{ км}^2$  (рис. 1, в, г, ж, з, и, к) и  $96 \times 112 \text{ км}^2$  (рис. 1, а, д). Масштаб изображений ПС указан на соответствующих рисунках. Как следует из приведенных примеров, различным облачным структурам соответствуют различные формы ПС (под формой ПС здесь понимается форма контура фотоизображения ПС, проведенного по определенному уровню оптической плотности).

Для кучевообразных облаков характерны ПС круглой формы (группа 1) (рис. 1, а). Если такие облака расположены на фоне поверхности со светлым фоном, то на фотоизображении хорошо видны тени, подчеркивающие границы облаков (рис. 1, в). Наличие теней приводит к дефициту пространственных частот в направлении, перпендикулярном направлению на Солнце из центра анализируемого фрагмента [2]. Поэтому при анализе изображений целесообразно разделить соответствующую группу облачности, выделив подгруппы без теней (1.1) и с тенями (1.2).

Линейно-периодические облачные структуры, характерные для слоистообразных облаков, как правило, имеют ПС более сложных форм. Можно выделить в этом типе облаков группу, для которой характерный размер элементов мезоструктуры и их направление существенно изменяются в пределах анализируемого фрагмента (группа 2), и группу с регулярными линейно-периодическими образованиями (группа 3). Второй группе облачности соответствуют вытянутые ПС с большим или меньшим эксцентриситетом. Примеры фотоизображений и ПС нерегулярных облачных линий показаны на рис. 1, ж, волнистых облаков — на рис. 1, з. (группа 2). Подчеркивание тенями волнистой структуры облаков изменяет форму спектра изображения, представленного на рис. 1, з, с эллиптической на

бабочкообразную. Облачные структуры без теней образуют подгруппу 2.1, структуры с тенями — подгруппу 2.2.

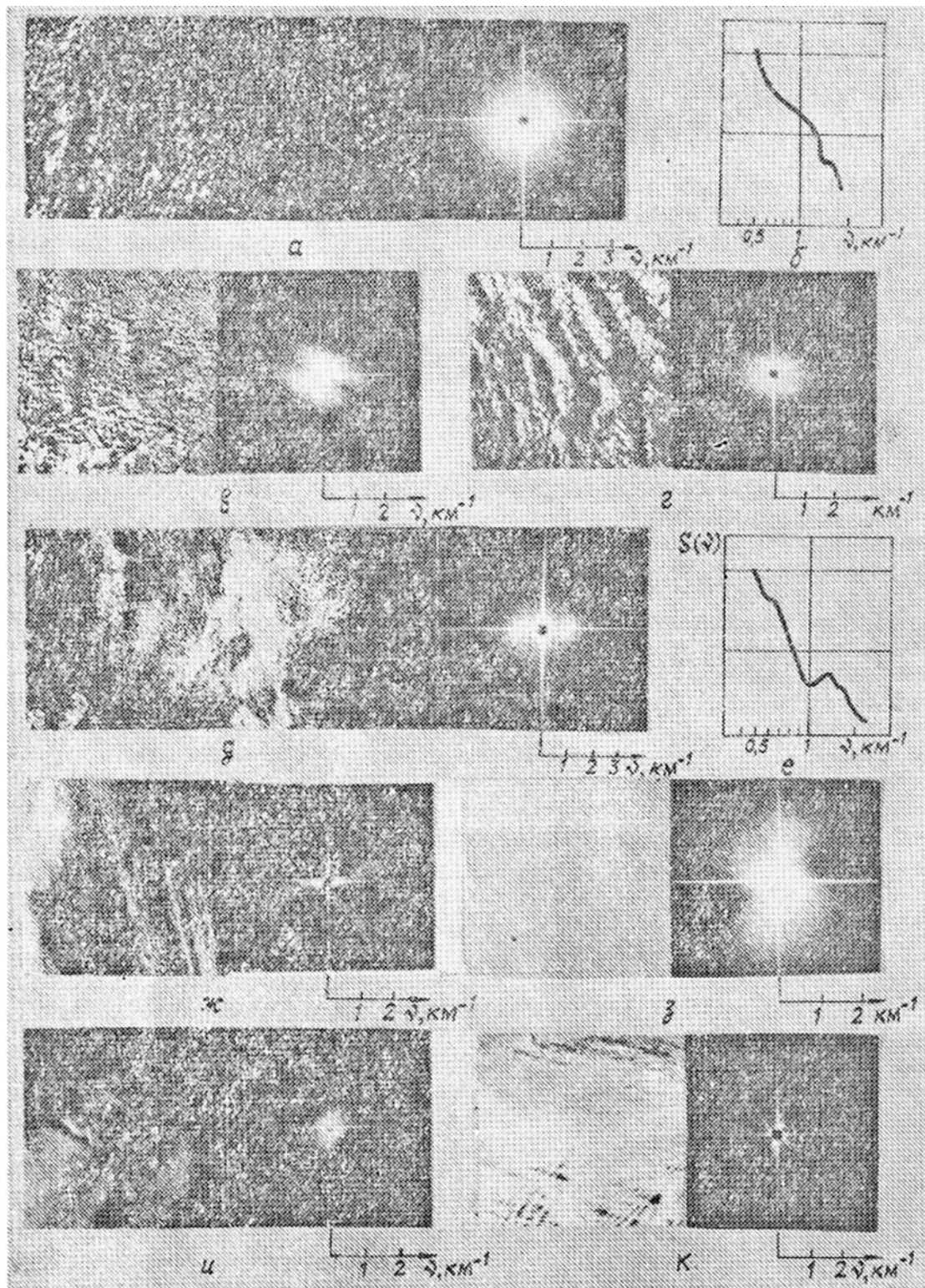


Рис. 1. Фотоизображения облачности и их ПС

Наиболее сложные формы ПС имеют облачные образования, содержащие регулярные структуры или их сочетания. К регулярным структурам относятся рядовые образования слоисто-кучевой облачности (рис. 1,г), цепочки конвективных облаков (рис. 1,д), орографические волны, возникающие при обтекании воздушным потоком неоднородностей рельефа (рис. 1,и, 1,к) и подынверсионные волнистые облака (рис. 1,к). Облачные ряды, показанные на рис. 1,г, имеют резкие края, практически

параллельные друг другу, что обуславливает появление светлой линии в центре ПС. Изотропная часть спектра продуцируется отдельными облачными элементами, размеры которых составляют от 0,5 до 10 км. Спектру орографических волн свойственно наличие тонких линий, не проходящих через центр симметрии ПС (рис. 1, *u*, 1, *к*). Крупномасштабные структуры, подобные мощным грядам или орографическим волнам, объединены в подгруппу 3.1. Облачным образованиям подгруппы 3.2 с близкими характерными размерами элементов структуры и мезоструктуры (облачные цепочки – рис. 1, *д*, волнистые облака – рис. 1, *к*) присущи многосвязные ПС, положение максимумов в которых соответствует характерным размерам элементов. Центральная часть ПС фрагмента, показанного на рис. 1, *к*, обусловлена наличием в его нижней части орографических волн.

### 3. Классификация и количественное описание форм двумерных спектров

Анализ результатов массовой обработки фотоизображений облачности (214 фрагментов) позволил установить, что типы форм двумерных ПС, присущих облачности, можно разделить на группы в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. Двумерные ПС облачности имеют в основном круглую  $F_1$  вытянутую  $F_2$  и сложную  $F_3$  формы. Спектры группы  $F_1$  в зависимости от условий освещения и конкретных особенностей подстилающей поверхности делятся на изотропные  $F_{11}$  и круглые с дефицитом пространственных частот  $F_{12}$ . Вытянутые ПС также делятся на подгруппы эллиптических спектров  $F_{21}$  и спектров с дефицитом пространственных частот  $F_{22}$ . К спектрам сложной формы  $F_3$  можно отнести односвязные  $F_{31}$ , и многосвязные  $F_{32}$ . Форма односвязных фигур весьма разнообразна (рис. 1, *z*, *д*, *u*). Многосвязные фигуры, как правило, содержат низкочастотную область произвольной формы и два (или более) боковых максимума, имеющих круглую или эллиптическую форму с внецентральным максимумом спектральной мощности.



Рис. 2. Классификация форм двумерных пространственных спектров

Одной из проблем, возникающих при решении различных прикладных задач, связанных со спектральным анализом изображений, например, при синтезе стохастических полей яркости, является аналитическое описание формы ПС. Вследствие линейности фурье-преобразования двумерные спектры сложной картины, включающей различные облачные структуры, можно представить в виде суперпозиции ПС более простых форм, соответствующих этим структурам

$$S(v, \varphi) = p_1 S_1(v, \varphi) + p_2 S_2(v, \varphi) + \dots + p_n S_n(v, \varphi), \quad (1)$$

где  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ ,  $\varphi = \arctg v_y / v_x$  – полярные координаты в спектральной плоскости;  $S_i(v, \varphi) = A_i v^{-2(\varphi)} \cdot Q(\varphi)$ ,  $a(\varphi)$  – параметр наклона;  $Q(\varphi)$  – функция формы;  $p$  – весовые множители;  $\sum p_i = 1$ . При этом члены, соответствующие взаимодействию волновых фронтов, идущих от различных частей изображения, усредняясь при фоторегистрации, создают серый тон в изображении ПС [8].

В качестве простых фигур  $S_i(v, \varphi)$  в аппроксимации (1) можно использовать круги  $a(\varphi) = \text{const}$ ,  $Q(\varphi) = \text{const}$ , эллипсы или гантелевидные фигуры, описываемые выражениями вида

$$S(\nu, \varphi) = A\nu^{-a} \cos^b \varphi, \quad (2)$$

где  $b$  – параметр.

Эти выражения, при соответствующем подборе параметров, могут использоваться для аппроксимации форм ПС рис. 1, *a, ж, з* соответственно. Сложный спектр рис. 1, *и* можно описать как совокупность двух нецентральных эллипсов (а при оконтуривании по более низкому уровню оптической плотности – как сочетание двух скрещенных центральных эллипсов). Параметры аппроксимирующих функций можно использовать в качестве информативных признаков при классификации ПС, но многообразие их вариантов делает эту задачу довольно сложно формализуемой. Более простым вариантом количественного описания ПС облачности являются информативные признаки, применяемые для распознавания формы плоских фигур [6], и структурно-зональные признаки, описывающие распределения энергии внутри фигуры спектра [7]. К признакам формы можно отнести параметр формы  $\Phi = S/P$ , отношение толщины  $T = 4\pi S/P^2$ , где  $S$  и  $P$  – площадь и периметр оконтуренного изображения ПС; отношение аспекта  $A = \frac{l_{\max}}{l_{\min}}$ , где  $l_{\max}$ ,  $l_{\min}$  – максимальная и минимальная стороны прямоугольника, описанного вокруг ПС [3]. В качестве структурно-зональных признаков использовались относительные значения мощности составляющих ПС в диапазонах пространственных частот  $\Delta\nu_m$ , рассчитываемые по формуле [3].

$$g_m = \int_0^{2\pi} \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} S(\nu, \varphi) \nu d\nu d\varphi / \int_0^{2\pi} \int_{\nu_{0\min}}^{\nu_{0\max}} S(\nu, \varphi) \nu d\nu d\varphi, \quad (3)$$

где  $S(\nu, \varphi)$  – распределение плотности энергии в спектральной плоскости, представленное в полярных координатах;  $\Delta\nu_0$  – диапазон пространственных частот, используемый для нормировки.

Как видно из примеров, показанных на рис. 1, наибольшие различия ПС наблюдаются при относительно высоких пространственных частотах, поэтому при расчетах были выбраны диапазоны  $\Delta\nu_1 = 0,9 \dots 1,1 \text{ км}^{-1}$ ,  $\Delta\nu_2 = 1,3 \dots 1,5 \text{ км}^{-1}$ ,  $\Delta\nu_0 = 0,5 \dots 0,7 \text{ км}^{-1}$ .

В табл. 1 в качестве примера приведены информативные признаки двумерных ПС, показанных на рис. 1, размерность признака  $\Phi$  в  $\text{км}^{-1}$ , остальные признаки безразмерные.

Таблица 1

Примеры информативных признаков двумерных спектров

Тип облачной ситуации	Форма ПС	Информативные признаки				
		$\Phi$	$T$	$A$	$g_1$	$g_2$
Кучевообразная облачность (подгруппа 1.1)	рис. 1, <i>a</i> , тип $F_1$	1,0	0,98	1,1	0,40	0,21
Кучевообразная облачность, тени (подгруппа 1.2)	рис. 1, <i>в</i> , тип $F_{12}$	0,58	0,4	1,5	0,52	0,24
Гряды слоистокучевых облаков (подгруппа 3.1)	рис. 1, <i>г</i> , тип $F_{31}$	0,70	0,32	1,7	0,44	0,30
Цепочки конвективных облаков (подгруппа 3.2)	рис. 1, <i>д</i> , тип $F_{31}$	0,44	0,72	2,8	0,36	0,62
Нерегулярные облачные линии (подгруппа 2.1)	рис. 1, <i>ж</i> , тип $F_{32}$	0,55	0,24	7,2	0,75	0,47
Подынверсионные волнистые облака (подгруппа 2.2)	рис. 1, <i>з</i> , тип $F_{21}$	1,6	0,72	1,2	0,75	0,51
Орографические волны (подгруппа 3.1)	рис. 1, <i>и</i> , тип $F_{31}$	0,92	0,80	1,1	0,54	0,39
Подынверсионные волнистые облака в сочетании с орографическими волнами (подгруппа 3.2)	рис. 1, <i>к</i> , тип $F_{32}$	0,70	0,30	3,7	3,1	3,3

Как видно из таблицы, диапазон применения информативных признаков достаточно широк. Наибольшие значения параметра формы  $\Phi$ , как правило, соответствуют спектрам форм I и II типов с небольшим отношением аспекта (рис. 1, а, э). Для вытянутых ПС с большим отношением аспекта (рис. 1, д, ж) значения параметра формы уменьшаются в 2 ... 3 раза (исключение составляет ПС, рис. 1, к). Отношение толщины оказывается тем меньше, чем больше отношение аспекта. Относительные мощности высокочастотных составляющих для всех анализируемых ПС, за исключением ПС (рис. 1, к), меньше низкочастотных. На примере сложного ПС видно, как существенно может влиять на распознавание облачных систем выбор параметров обработки. Низкочастотная часть ПС имеет малую мощность, а оба высокочастотных интервала, для которых рассчитаны признаки  $g_1$  и  $g_2$ , захватывают боковой максимум, что и приводит к значительному отличию этого ПС от других. Как правило,  $g_1 < g_2$ , так как мощность спектральных составляющих в среднем уменьшается с ростом частоты. Однако выбор интервалов  $\Delta\nu_1$  и  $\Delta\nu_2$ , при котором первый из них перекрывает локальный минимум ПС (рис. 1, д, е), приводит к инверсии признаков  $g_1$  и  $g_2$ .

#### 4. Статистическая разделимость групп облачности по признакам двумерных спектров

По результатам оптико-цифровой обработки фотоизображений были сформированы выборочные массивы информативных признаков ПС облачности, в соответствии с выделенными в п. 2 группами (объемы выборок составляли  $n = 8 \dots 26$ ).

В качестве меры различия ПС в выбранном пространстве информативных признаков использовалось евклидово расстояние между центрами соответствующих групп, рассчитываемое по формуле

$$d_{ij} = | \langle \bar{x}_i \rangle - \langle \bar{x}_j \rangle | = \sqrt{\sum_{k=1}^5 d_{ijk}^2}, \quad (4)$$

где  $i, j$  — номера групп;  $\langle \bar{x} \rangle$  — среднее значение вектора информативных признаков  $\bar{x} = \{\Phi, T, A, g_1, g_2\}$ .

Применение более сложных метрик нецелесообразно, так как при сравнительно небольших объемах выборок по каждой группе ПС это может привести к заведомо неверным выводам [9].

Результаты расчета одномерных расстояний между различными группами приведены в табл. 2. Там же приведены относительные значения этих расстояний  $\tilde{d}_{ijk} = d_{ijk} / d_{k_{\max}}$ , нормированные на максимум по каждому признаку, и пятимерное евклидово расстояние между группами рассчитанное по формуле (2), с использованием  $\tilde{d}_{ijk}$ .

Ненормированные расстояния по признаку  $\Phi$  имеют размерность в  $\text{км}^{-1}$ , остальные расстояния безразмерны.

Как видно из табл. 2, попарные расстояния между тремя группами ПС  $d_{ij\Sigma} \geq 1$ . При этом группа круглых ПС отличается от эллиптических в первую очередь по признакам формы (значения расстояния  $\tilde{d}_{ijk}$  по признакам формы составляют 0,67 ... 0,28, а по признакам  $g_1$  и  $g_2$  0,1 ... 0,4). Для расстояния  $d_{13\Sigma}$  вес структурно-зональных признаков несколько выше, чем для  $d_{12\Sigma}$ , что связано с увеличением вклада высокочастотных составляющих в формирование величин  $g_1$  и  $g_2$  для ПС сложных форм. Наибольшие значения расстояния между группами 1 и 2 достигают для признаков  $\Phi, g_1, g_2$  и составляют величины 0,47 ... 0,54, тогда как по  $T$  и  $A$  величина этих расстояний 0,16 ... 0,03. Для классификации ПС групп 3.1 и 3.2 предпочтительнее структурно-зональные признаки (расстояния между этими группами по признакам  $g_1$  и  $g_2$  составляют 0,8 ... 1, а по признакам формы — 0 ... 0,5). В качестве количественного критерия классификации ПС облачности можно использовать функцию желательности Харрингтона  $H_d$ , определяемую выражением [4]

$$H_d(d_{ij}) = \exp\{-\exp[-b_0(d_{ij} - d_0)/d_0]\}, \quad (5)$$

где под  $d_{ij}$  понимается любой тип расстояния между группами  $i$  и  $j$ ;  $d_0$  — параметр, определяемый из условия  $H_d(d_{ij}) = 0,37$  [4];  $b_0$  — параметр крутизны.

Эта функция ставит в соответствие качественным оценкам аргумента  $d_{ij}$  «хорошо», «удовлетворительно», «плохо» конкретные числовые значения  $H_d$ . Считая, что значение одномерного расстояния между группами  $i$  и  $j$   $d_{ij} = 1$  и соответствует границе между оценками «хорошо» и «удовлетворительно», и полагая  $b_0 = 1$ , получим, что хорошо различаются группы, для которых  $d_{ij} > 1$ ; удовлетворительно — при  $0,56 < d_{ij} \leq 1$  и плохо — при  $0,3 < d_{ij} \leq 0,56$ . Как видно из табл. 2, в выбранном пятимерном пространстве признаков хорошо распознаются группы 1–2, 1–3, 2–3, удовлетворительно — 1.1–1.2, плохо — 2.1–2.2.

Евклидовы расстояния между группами в различных пространствах информативных признаков

Номера групп и подгрупп	Вид расстояний	Информативные признаки					
		$\Phi$	$T$	$A$	$g_1$	$g_2$	$d_{ijz}$
1—2	$d_{ijx}$	0,58	0,13	1,5	0,11	0,04	1,0
	$\bar{d}_{ijx}$	0,67	0,67	0,28	0,10	0,04	
1—3	$d_{ijx}$	0,87	0,17	1,30	0,63	0,64	1,5
	$\bar{d}_{ijx}$	1,0	0,84	0,24	0,56	0,56	
2—3	$d_{ijx}$	0,42	0,03	0,21	0,52	0,63	1,0
	$\bar{d}_{ijx}$	0,48	0,16	0,03	0,47	0,54	
1.1—1.2	$d_{ijx}$	0,74	0,00	0,08	0,14	0,30	0,89
	$\bar{d}_{ijx}$	0,84	0,00	0,01	0,13	0,26	
2.1—2.2	$d_{ijx}$	0,15	0,02	2,0	0,14	0,00	0,42
	$\bar{d}_{ijx}$	0,17	0,03	0,37	0,13	0,00	
3.1—3.2	$d_{ijx}$	0,63	0,17	0,14	1,0	1,2	1,4
	$\bar{d}_{ijx}$	0,73	0,87	0,02	0,90	1,0	

Для выделения облачных структур с теньями, приводящими к дефициту спектральных составляющих (подгруппы 1.2 и 2.2), можно использовать, например, распределение энергии в азимутальном направлении  $E_\varphi$ , рассчитываемое по формуле

$$E_\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} S(\nu, \varphi) \nu d\nu. \quad (6)$$

В качестве дополнительного признака можно также использовать распределение энергии  $E_\nu$  в радиальных сечениях ПС:

$$E_\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} S(\nu, \varphi) d\nu. \quad (7)$$

На рис. 1, б, е показаны разрезы соответствующих двумерных ПС в направлении горизонтальной оси, демонстрирующие различие признака  $E_\nu$  для облачности с линейно-периодической структурой и равномерно распределенной по пространству.

Из анализа различий между выделенными разновидностями облаков, которые оцениваются по расстоянию между ПС их изображений в пространстве пяти информативных признаков, следует, что слоистообразная облачность с регулярными (группа 3) и нерегулярными (группа 2) структурами, а также кучевообразная облачность (группа 1) могут быть уверенно классифицированы. Применение структурно-зональных признаков дает возможность распознавать и некоторые разновидности слоистообразных облаков. Таким образом, информативные признаки ПС изображений облачности могут использоваться в системах обработки космических изображений для классификации облачных форм.

1. Бондур В. Г., Кулешов Ю. П., Савин А. И. // Материалы VIII Всес. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР. 1986. С. 206—210.
2. Бондур В. Г., Воляк К. И. // В сб.: Исследования по гидрофизике. Труды ФИАН СССР. М.: Наука. 1984. Т. 156. С. 63—77.
3. Бондур В. Г., Кулаков В. В., Лобзенкова Н. П. // Тезисы докладов VI Всес. школы по оптической обработке информации. Фрунзе. 1986. С. 122—123.
4. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука. 1976. 278 с.
5. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир. 1976. 428 с.
6. Зиман Я. Л. // Исследование Земли из космоса. 1980. № 4. С. 81—84.
7. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир. 1970. 364 с.
8. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М.: Статистика. 1977. 128 с.

Поступила в редакцию  
13 июля 1988 г.

N. I. Arzhenenko, V. G. Bondur. **Cloud Type Classification Using Spatial Image Spectra.**

Satellite images were processed to yield a set of characteristics for a quantitative analysis of spatial spectra of different cloud types. The resulting spectral shapes are described. The feasibility of statistical discrimination between various cloud types based on the maximum distance test in the five-dimensional Euclidean space of cloud characteristics was estimated.