

О КЛАССИФИКАЦИИ РЕЛЬЕФА

Количественная оценка микрорельефа представляет большой интерес, поскольку выполненные в данной области исследования [5, 6] не дают надежных количественных критериев, по которым можно было бы судить о пересеченности, ориентированию текстурных признаков.

В настоящее время широко используют непрерывное двухмерное преобразование Фурье, получаемое с помощью когерентно-оптических устройств. Таким образом, можно выделить признаки анализируемой поверхности. При этом оптическая система создает электрическое поле, пропорциональное двумерному спектру. Усреднением Фурье-образов однотипных ландшафтов создается картотека спектров, так как спектр Фурье позволяет получать точное и удобное математическое описание структуры изображения.

При цифровой записи рельефа в результате математической обработки легко получить двухмерные энергетические спектры [4] и автокорреляционные функции участков земной поверхности или поверхности дна моря. В результате можно выявить анизотропию рельефа, т. е. неодинаковую расчлененность рельефа по разным направлениям. Двухмерные энергетические спектры будут соответствовать спектрам, получаемым когерентно-оптическими устройствами и обладать теми же свойствами. Следовательно, их можно интерпретировать как спектры, полученные аналоговыми методами.

Двухмерную автокорреляционную функцию можно представить выражением

$$B(\varepsilon, \eta; j, k) = \sum_{j=0}^{N_1-1} \sum_{k=0}^{N_2-1} f(x, y) f(x - \varepsilon; y - \eta). \quad (1)$$

$B(\varepsilon, \eta; j, k)$ вычисляют на окне размером $N_1 \times N_2$ для каждой дискретной точки функции $f(x, y)$.

Однако спектр Фурье двухмерной автокорреляционной функции равен квадрату модуля спектра Фурье исходного изображения. Следовательно, $B(\varepsilon, \eta; j, k)$ можно найти из преобразования Фурье, т. е. обратным преобразованием из квадрата модуля амплитудно-фазовой характеристики:

$$B(\varepsilon, \eta; j, k) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{j=0}^{N_1-1} \sum_{k=0}^{N_2-1} |S(\omega_x, \omega_y)|^2 \exp\left(\frac{\omega_x x}{N_1} + \frac{\omega_y y}{N_2}\right) \Delta\omega_x \Delta\omega_y, \quad (2)$$

где $S(\omega_x, \omega_y)$ — преобразование Фурье функции $f(x, y)$. Согласно теореме Парсеваля, два представления энергии изображения через функцию $f(x, y)$ и так называемый энергетический спектр Фурье $G(\omega_x, \omega_y)$, или спектр дисперсий, связаны между собой выражением

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x, y)|^2 dx dy = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y. \quad (3)$$

В связи с этим энергетический спектр вычисляют как произведение спектра Фурье исходной функции на комплексно-сопряженный

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega_x, \omega_y) S^*(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y, \quad (4)$$

где $S^*(\omega_x, \omega_y)$ — комплексно-сопряженный спектр Фурье к спектру $S(\omega_x, \omega_y)$.

Так же как двухмерный спектр Фурье изображения рельефа, двухмерный энергетический спектр и двухмерную автокорреляционную функцию можно использовать в качестве критериев для классификации рельефа.

Экспериментальные исследования выполняли с использованием эталонов из [3]. Рельеф каждого эталона задан с помощью цифровой модели отметками в перекрестиях сетки квадратов размером 21×21 .

Первая категория рельефа — плоскоравнинный участок с небольшой впадиной в центре с перепадом высот (приняв сечение рельефа 1 м) около 2 м.

Третья категория представляет собой участок с речкой, протекающей в меридиональном направлении. В широтном направ-

Значения нормированной двухмерной автокорреляционной функции

$r_1 \backslash r_2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Категория 1												
0	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93
1	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93
2	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93
3	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
4	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
5	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92
6	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92
7	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
8	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
9	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90
10	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90
11	0,94	0,53	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90
Категория 3												
0	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
1	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93
2	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89
3	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
4	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83
5	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
6	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
7	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
8	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
9	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76
10	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
11	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Категория 5												
0	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95
1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
2	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
3	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
4	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
5	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
6	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76
7	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
8	0,69	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
9	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
10	0,65	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
11	0,66	0,66	0,66	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Категория 7												
0	1,00	0,97	0,92	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74	0,72	0,71	0,71	0,71
1	0,96	0,94	0,92	0,88	0,85	0,82	0,79	0,76	0,74	0,73	0,72	0,72
2	0,92	0,91	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,77	0,74	0,73	0,73	0,73
3	0,88	0,88	0,87	0,85	0,83	0,81	0,80	0,78	0,75	0,74	0,73	0,73
4	0,86	0,85	0,84	0,82	0,80	0,79	0,78	0,76	0,75	0,74	0,74	0,74
5	0,85	0,84	0,82	0,80	0,78	0,76	0,75	0,75	0,74	0,74	0,73	0,73
6	0,84	0,83	0,81	0,79	0,76	0,74	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
7	0,85	0,83	0,82	0,79	0,76	0,73	0,72	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
8	0,87	0,85	0,83	0,80	0,76	0,73	0,71	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70
9	0,89	0,87	0,84	0,82	0,77	0,74	0,72	0,71	0,70	0,69	0,69	0,69
10	0,90	0,88	0,86	0,83	0,79	0,76	0,73	0,71	0,70	0,69	0,68	0,68
11	0,90	0,90	0,87	0,84	0,81	0,78	0,75	0,73	0,71	0,70	0,69	0,69

лении рельеф образует две выпуклости. Перепад высот на участке достигает 26 м.

Участок рельефа пятой категории трудности имеет пять ярко выраженных промоин в широтном направлении и одну выпуклость в меридиональном направлении. Значительное количество мелких форм свидетельствует о шероховатости. Максимальный перепад высот 12 м.

Рельеф седьмой категории — сильно пересеченная местность по всем направлениям с большим количеством мелких форм. Перепад высот на участке 28 м.

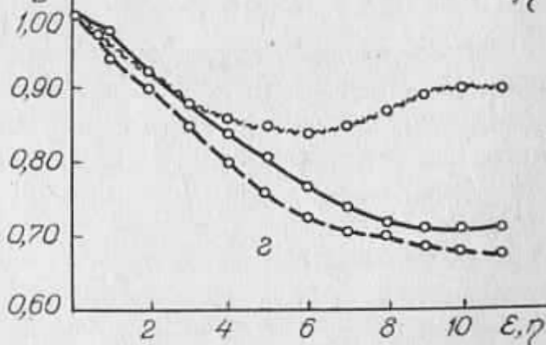
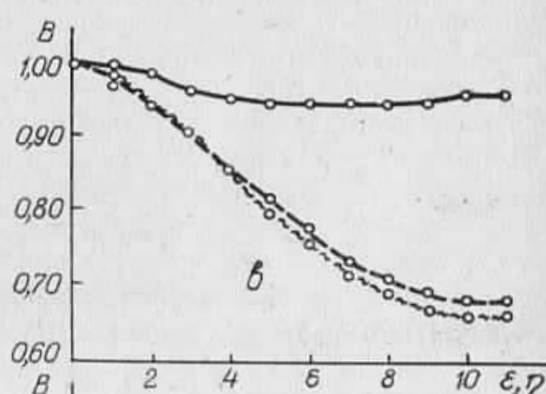
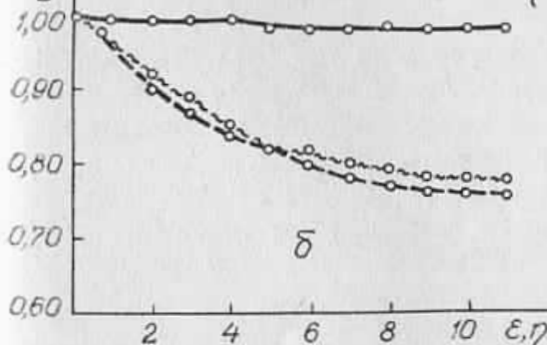
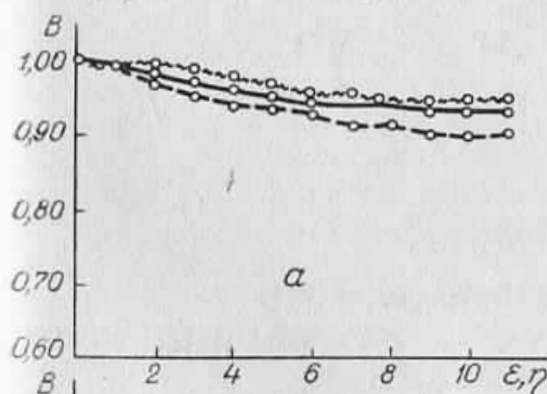
Так как анализ двумерных преобразований Фурье от изображения рельефа выполнен в [4], здесь опишем автокорреляционные функции. Двумерные нормированные автокорреляционные функции, вычисленные с использованием (3) и (4), представлены в табл. 1 (начало координат находится в левом верхнем углу). В табл. 2 приведены сдвиги этих же функций.

Анализ результатов, представленных в табл. 1 и 2, показывает, что крутизна автокорреляционной функции возрастает с увели-

Таблица 2

Смещения, соответствующие заданным значениям $B(\varepsilon, \eta; j, k)$

Номер рис. из [3]	Категория	Значения $B(\varepsilon, \eta; jk)$					
		0,90		0,80		0,70	
		ε	η	ε	η	ε	η
3	1	10	10	—	—	—	—
15	3	3	1	6	5	—	—
32	5	3	0	5	0	8	0
48	7	7	2	5	3	8	7



Профили нормированных пространственных автокорреляционных функций категорий рельефа: первой (а), третьей (б), пятой (в), седьмой (г):

----- вдоль оси x ; ————— вдоль оси y ; - - - - - вдоль диагональных элементов.

чением сложности рельефа, но не в одинаковой степени по разным направлениям.

В некоторых случаях по разным направлениям автокорреляционная функция имеет различную крутизну, что свидетельствует об анизотропии представленного образца рельефа, наблюдаемой и визуально на рисунках в [3]. На нашем рисунке показаны профили пространственной автокорреляционной функции для указанных категорий рельефа вдоль осей и вдоль диагональных элементов. Они наглядно подтверждают описания $B(\epsilon, \eta; j, k)$.

Как и в случае одномерного корреляционного анализа [1] пространственную автокорреляционную функцию по различным направлениям можно без особых затруднений аппроксимировать аналитическим выражением, представляющим сложность рельефа.

Таким образом, сложный и подверженный субъективизму процесс классификации рельефа с применением пространственной автокорреляционной функции приобретает корректность и строгость.

Список литературы: 1. Бойко А. В. Методы и средства автоматизации топографических съемок. — М.: Недра, 1980. 2. Дуда Р., Харп П. Распознавание образов и анализ сцен. — М.: Мир, 1976. 3. Единые нормы выработки (времени) на геодезические и топографические работы: Камеральные работы. — М.: Недра, 1966. 4. Рудый Р. М. К анализу рельефа местности. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1984, вып. 40. 5. Beyer A. Zur Erfassung flacher Geländes durch willkürlich verteilte Höhenpunkte. — Vermesungstechnike, 1972, v. 20, № 7. 6. Silar F. Interpolace vyšek pomoci digital niho modelu terenu. — Geod. a kartogr. obz., 1972, v. 18, № 10.