

М.И. Алленов, А.И. Гусев, Н.П. Иванова, В.В. Сулимов

## О ВАРИАЦИЯХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ (СПЭЯ) ЭЛЕМЕНТОВ ЛАНДШАФТА В ДИАПАЗОНЕ 0,4–1,2 мкм

Институт экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун» Росгидромета,  
г. Обнинск Калужской обл.

Поступила в редакцию 4.02.98 г.

Принята к печати 27.11.98 г.

Приводятся статистические характеристики спектральной плотности энергетической яркости элементов ландшафта: травы, почвы и леса. Определены корреляционные временные связи между эталонными (первыми) и последующими реализациями, смещенными по времени на несколько суток и декад.

На полигоне г. Обнинска с высотной 313-м метеорологической мачты были получены экспериментальные данные вариаций спектральной плотности энергетической яркости ландшафта. Некоторые результаты исследования такой изменчивости для различных элементов ландшафта, метеорологических условий и длин волн приведены в табл. 1.

Измерения СПЭЯ проводились на длинах волн 0,43; 0,482; 0,544; 0,66; 0,711; 0,772; 0,801; 0,864; 0,93; 1,020; 1,125; 1,210 мкм с помощью спектрорадиометра, который устанавливается на сканирующую платформу. Сканирование пространства осуществлялось в различных направлениях с надирными углами от 90 до 40°. Результаты, приведенные в табл. 1, усреднены по нескольким сотням реализаций.

Реализации, как правило, разбивались на 100–150 значений с интервалами, соответствующими пространственному разрешению прибора.

Измерения проводились, когда исследуемые трассы были равномерно освещены солнечным светом, т.е. на трассах не наблюдалось теней от облаков.

Эти результаты получены в околополуденное время (московское) с 11 до 14 ч в различные весенние и осенние сезоны 1984–1986 гг. Как видно из табл. 1, имеется уменьшение СПЭЯ для длины волны 0,66 мкм, причем минимумы в различные сезоны имеют разную величину. Как правило, они сильнее выражены в весеннее время, что связано с увеличением в биомассе растений хлорофилла, и несколько сглажены для осеннего времени, когда хлорофилла становится меньше.

Таблица 1

Средние значения СПЭЯ  $\mu \cdot 10^6$ , Вт/(см<sup>2</sup> · ср · нм), ее дисперсии  $\sigma^2 \cdot 10^{14}$ , Вт/(см<sup>2</sup> · ср · нм), и коэффициенты вариации  $\sqrt{\sigma^2}/\mu$ 

Состояние неба	Измеряемая величина	$\lambda$ , нм										
		437	481	544	660	772	801	864	930	1020	1125	1210
		Почва, весна, угол наблюдения 42°										
Ясно	$\mu$	0,65	0,82	1,12	1,1	0,83	0,75	0,68	0,3	0,36	0,13	0,2
Сплошная облачность	$\mu$	0,04	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02
		Трава, весна, угол наблюдения 42°										
Ясно	$\mu$	0,19	0,36	0,6	0,48	1,67	1,65	1,16	0,73	0,8	0,22	0,26
	$\sigma^2$	0,6	0,5	1,2	3,1	20,7	25,4	24,1	7,1	15,2	2,27	4,5
	$\sqrt{\sigma^2}/\mu$	0,41	0,20	0,18	0,37	0,27	0,31	0,42	0,37	0,49	0,68	0,82
		Трава, осень, угол наблюдения 42°										
Ясно	$\mu$	0,31	0,49	0,59	0,59	1,4	1,37	1,06	0,7	0,87	0,29	0,36
	$\sigma^2$	0,8	0,7	1,9	4,2	36,5	47,3	31,2	9,4	20,1	3,33	5,78
	$\sqrt{\sigma^2}/\mu$	0,29	0,17	0,23	0,35	0,43	0,50	0,53	0,44	0,52	0,63	0,67
		Лес, весна, угол наблюдения 60°										
Ясно	$\mu$	0,49	0,46	0,6	0,37	2,50	2,0	1,8	1,04	1,5	0,54	0,7
	$\sigma^2$	1,9	1,4	1,7	3,40	45,9	51,7	47,2	20,4	27,5	16,0	21,9
	$\sqrt{\sigma^2}/\mu$	0,28	0,26	0,22	0,50	0,27	0,36	0,38	0,43	0,35	0,74	0,67
		Лес, осень, угол наблюдения 60°										
Ясно	$\mu$	0,36	0,39	0,75	0,71	2,1	1,8	2,1	1,05	1,8	0,47	0,9
	$\sigma^2$	0,9	1,3	1,6	4,9	60,4	59,1	53,6	21,2	29,7	20,5	24,3
	$\sqrt{\sigma^2}/\mu$	0,26	0,29	0,17	0,31	0,37	0,43	0,35	0,44	0,30	0,97	0,54

В табл. 2 приведены метеорологические условия и коэффициенты взаимной корреляции, полученные по методике [1].

Сначала измерения яркостных характеристик элементов ландшафта проводилось в условиях безоблачного неба, эти измерения-реализации считались эталонными. Затем проводились измерения

в другие дни со сходными метеорологическими ситуациями, и по полученным и эталонным реализациям определялись коэффициенты корреляции для различных длин волн и интервалов временного смещения (интервалов времени, прошедшего между регистрацией эталонных реализаций и повторных реализаций, полученных в другие дни).

Таблица 2

Коэффициенты взаимной корреляции для травы и леса (июнь 1987 г.)

Дни измерений	Метеоусловия (форма, балл облачности)							Длина волны, мкм
	Cu	Ci	CiAcCu	Ac	CbAcCi	AcCuCi	CuCi	
	2/2	3/0	10/1	10/0	8/4	8/3	9/7	
	01	03	06	08	16	20	23	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Трава							
01	1,0	0,91	0,7	0,55	–	–	–	
03		1,0	0,82	0,70	–	–	–	
06			1,0	0,9	0,42	–	–	
08				1,0	0,52	–	–	0,43
16					1,0	0,75	0,58	
20						1,0	0,8	
23							1,0	
01	1,0	0,9	0,72	0,6	–	–	–	
03		1,0	0,84	0,65	–	–	–	
06			1,0	0,9	0,45	–	–	
08				1,0	0,59	–	–	0,482
16					1,0	0,78	0,62	
20						1,0	0,83	
23							1,0	
01	1,0	0,94	0,82	0,65	–	–	–	
03		1,0	0,9	0,76	0,4	–	–	
06			1,0	0,93	0,53	0,45	–	
08				1,0	0,65	0,4	–	0,544
16					1,0	0,84	0,69	
20						1,0	0,82	
23							1,0	
01	1,0	0,96	0,90	0,82	0,4	–	–	
03		1,0	0,94	0,89	0,52	–	–	
06			1,0	0,95	0,70	0,6	–	
08				1,0	0,79	0,58	0,42	0,66
16					1,0	0,92	0,83	
20						1,0	0,85	
23							1,0	
01	1,0	0,95	0,85	0,78	–	–	–	
03		1,0	0,93	0,87	0,47	–	–	
06			1,0	0,94	0,63	0,4	–	0,772
08				1,0	0,73	0,51	–	
16					1,0	0,37	0,7	
20						1,0	0,82	
23							1,0	
01	1,0	0,95	0,86	0,78	–	–	–	
03		1,0	0,94	0,89	0,50	–	–	
06			1,0	0,95	0,66	0,42	–	0,864
08				1,0	0,76	0,54	–	
16					1,0	0,89	0,71	
20						1,0	0,82	
23							1,0	
01	1,0	0,92	0,81	0,72	–	–	–	
03		1,0	0,9	0,81	0,45	–	–	
06			1,0	0,91	0,64	0,40	–	1,210
08				1,0	0,72	0,5	–	
16					1,0	0,84	0,67	
20						1,0	0,81	
23							1,0	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
				Лес				
01	1,0	0,94	0,79	0,62	0,4	–	–	
03		1,0	0,9	0,72	0,42	–	–	
06			1,0	0,93	0,52	–	–	0,43
08				1,0	0,56	–	–	
16					1,0	0,82	0,61	
20						1,0	0,86	
23							1,0	
01	1,0	0,94	0,74	0,63	0,42	–	–	
03		1,0	0,92	0,8	0,46	–	–	
06			1,0	0,93	0,56	–	–	0,482
08				1,0	0,61	0,42	–	
16					1,0	0,8	0,66	
20						1,0	0,84	
23							1,0	
01	1,0	0,95	0,87	0,79	0,5	–	–	
03		1,0	0,9	0,85	0,6	0,42	–	
06			1,0	0,95	0,7	0,56	0,41	0,544
08				1,0	0,75	0,62	0,5	
16					1,0	0,87	0,76	
20						1,0	0,89	
23							1,0	
01	1,0	0,96	0,92	0,9	0,63	0,51	0,4	
03		1,0	0,95	0,92	0,72	0,59	0,5	
06			1,0	0,96	0,80	0,70	0,59	0,66
08				1,0	0,85	0,75	0,64	
16					1,0	0,94	0,83	
20						1,0	0,91	
23							1,0	
01	1,0	0,95	0,9	0,85	0,6	0,45	–	
03		1,0	0,93	0,90	0,64	0,5	0,4	
06			1,0	0,95	0,75	0,62	0,5	0,772
08				1,0	0,81	0,69	0,6	
16					1,0	0,92	0,84	
20						1,0	0,9	
23							1,0	
01	1,0	0,95	0,91	0,87	0,63	0,45	–	
03		1,0	0,93	0,91	0,67	0,51	0,4	
06			1,0	0,95	0,76	0,62	0,53	0,864
08				1,0	0,82	0,71	0,63	
16					1,0	0,92	0,81	
20						1,0	0,9	
23							1,0	
01	1,0	0,94	0,88	0,86	0,58	0,41	–	
03		1,0	0,91	0,86	0,62	0,49	–	
06			1,0	0,94	0,73	0,60	0,47	1,210
08				1,0	0,80	0,67	0,6	
16					1,0	0,91	0,81	
20						1,0	0,86	
23							1,0	

Примечание. Обозначение форм облачности: Сu – кучевая, Сi – перистая, Ас – высококучевая, Сб – кучево-дождевая. Прочерк означает, что коэффициент взаимной корреляции меньше 0,4.

Расчеты коэффициентов взаимной корреляции проводились по формуле

$$r_{\kappa, \kappa_0, \lambda_n} = \frac{\sum_{i=1}^N B_i^{\kappa, \lambda_n} B_i^{\kappa_0, \lambda_n} - N \overline{B^{\kappa, \lambda_n}} \overline{B^{\kappa_0, \lambda_n}}}{\left\{ \left[ \sum_{i=1}^N (B_i^{\kappa, \lambda_n})^2 - N (\overline{B^{\kappa, \lambda_n}})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^N (B_i^{\kappa_0, \lambda_n})^2 - N (\overline{B^{\kappa_0, \lambda_n}})^2 \right] \right\}^{1/2}},$$

где  $\lambda_n$  – номер длины волны;  $\kappa$  – номер реализации;  $\kappa_0$  – номер эталонной реализации для длины волны  $\lambda_n$  с

номером  $n$ ;  $B_i^{\kappa, \lambda_n}$ ,  $B_i^{\kappa_0, \lambda_n}$  – значения энергетической яркости в  $i$ -й точке  $\kappa$ -й и эталонной реализации, соответственно, для

волны  $\lambda_n$ ;  $\overline{B^{k,\lambda_n}}$  – среднее значение энергетической яркости для реализации  $k$  и длины волны  $\lambda_n$ ;  $\overline{B^{k_0,\lambda_n}}$  – среднее значение энергетической яркости для эталонной реализации  $k_0$  с длиной волны  $\lambda_n$ .

Коэффициенты корреляции получены при различных временных смещениях от 2 до 22 дней. Они усреднены по 10–17 значениям для сходных условий измерений. Как видно из табл. 2, значения коэффициентов быстро убывают с увеличением интервала временного смещения. Особенно это проявляется для длин волн 0,43; 0,482 и 0,544 мкм. Такое уменьшение связано с более сильным рассеянием солнечного света на этих длинах волн, что отмечалось в [2]. Следует заметить также и то, что трасса за период измерений изменилась. В начале измерений она была светло-зеленого цвета, затем отдельные участки трассы стали желтоватыми из-за цветения, а в конце цикла измерений на траве появились полусухие стебельки, кое-где трасса была выкошена.

На других, более длинных, волнах коэффициенты заметно выше, чем на коротких. Более высокими они оказались для полосы поглощения хлорофилла (около 0,66 мкм). Для леса корреляционные связи для тех же временных интервалов несколько сильнее (теснее), чем для травы. Причем коэффициенты выше как для коротковолновой части спектра, так и для более длинных волн. Визуально трасса, на которой находился лес, за время измерений практически оставалась постоянной.

Повышенные значения коэффициентов следует связывать с тем, что угол надир при измерениях составлял в среднем  $72^\circ$ . При таких больших углах могла проявлять себя подсветка от облаков, находящихся в пригоризонтной зоне. Это влияние было замечено ранее, о чем сообщалось в [1].

1. Алленов М.И. Структура оптического излучения природных объектов. М.: Гидрометеониздат, 1988. 164 с.
2. Алленов М.И., Гусев А.И., Ген А.А., Сулимов Н.Н., Третьяков Н.Д. О временных корреляционных связях яркостных характеристик элементов ландшафта в видимой и ИК-областях спектра // Труды ИЭМ. 1997. Вып. 28. С. 98–103.

*M.I. Allenov, A.I. Gusev, N.P. Ivanova, V.V. Sulimov. On Variations of Energy Brightness Spectral Density (EBS) of Landscape Elements within the Range of 0,4–1,2  $\mu\text{m}$ .*

Statistical characteristics of energy brightness spectral density of landscape elements, i.e. of grass, soil and forest, are given. The correlational temporal relationships for reference (primary) and later realizations shifted in time by several days and decades are determined.