

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.521.14

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

Самолетные исследования корреляции яркости элементов ландшафта в интервалах диапазона 0,4–1,2 мкм

НПО «Тайфун», г. Обнинск Калужской области

Поступила в редакцию 09.03.99 г.

Приводятся результаты исследований корреляционных связей между флуктуациями энергетической яркости, зарегистрированными на трассе длиной 6 км в интервалах спектра с  $\lambda_{max}$ : 445, 540, 650, 800 и 1050 нм. На трассах находились поля культурных растений, чистый пар, водная поверхность, лес и др.

Выявлены устойчивые яркостные признаки трасс при различных метеорологических условиях.

В работах [1–3] рассматривался вопрос исследования корреляционных связей между флуктуациями спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) элементов подстилающей поверхности: леса, травы, почв, полей культурных растений и других, при различных метеорологических условиях. Оказалось, что значения коэффициентов взаимной корреляции, рассчитанные по эталонным (первичным) и последующим измерениям для сходных условий измерения (метеорологических условий, высоты Солнца, времени), но смещенных по времени на несколько дней, значительно убывают. Тем самым было показано, что при поисках признаков распознавания состояния элементов ландшафта следует периодически вводить эталонные реализации или отдельные реперные значения и с ними затем сравнивать последующие измерения.

В этой статье приводятся результаты исследований корреляционных связей, рассчитанных по измерениям с самолета за более длительный период.

Для исследований яркостных характеристик элементов ландшафта были выбраны два маршрута (табл. 1).

Таблица 1

Описание маршрутов

Маршрут №1. Направление с юго-востока на северо-запад	Маршрут №2. Направление с северо-востока на юго-запад
Лес	Лес
Залив	Залив
Лес	Лес
Поле (озимая пшеница)	Поле (озимая пшеница)
Грунтовая дорога	Лес
Поле (кормосмесь)	Поле (овес)
Лесополоса	Лесополоса
Поле (чистый пар)	Поле (озимая пшеница)
Лесополоса	Водохранилище
Поле (озимая пшеница)	–
Лес	–
Водохранилище	–

Измерения проводились при помощи спектрорадиометров в интервалах, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Канал	$\lambda_{max}$ , нм	$\Delta\lambda_{0,5}$ , нм
1	445	34
2	540	43
3	650	42
4	800	60
5	1050	10

Длины трасс составляли 6 км. Пространственное разрешение на местности с высоты полета 100 м составляло в среднем 1,2 м, однако результаты, приведенные здесь, получены с квантованием реализации через 10 м.

Отметим особенности распределения СПЭЯ на различных элементах ландшафта.

1. Поверхность воды характеризуется сравнительно малыми пространственными вариациями спектральной яркости во всех каналах спектрометра при высотах Солнца 42 и 53° и в условиях облачного неба. С ростом высоты Солнца до 59 и 65° уровень яркости водной поверхности в видимом диапазоне спектра резко возрастает и увеличивается пространственная неоднородность отраженной радиации. Это объясняется появлением в поле зрения прибора при высоком Солнце бликов на водной поверхности.

2. Участок леса отличается от других объектов прежде всего более высокой пространственной неоднородностью поля отраженной радиации в зеленой и ближней инфракрасной областях спектра. Масштаб пространственных вариаций несколько ниже в условиях освещения рассеянным излучением при сплошной облачности по сравнению с условиями ясного неба.

3. Озимая пшеница характеризуется значительно меньшим масштабом пространственных вариаций отраженной радиации по сравнению с лесом в условиях как ясного неба, так и сплошной облачности.

4. Вследствие существенных вариаций отражающих свойств водной поверхности в видимом диапазоне спектра наблюдается изменение контраста (вплоть до изменения знака) между водой и растительностью при изменении высоты Солнца или метеоусловий. Существенных изменений относительно контраста между лесной растительностью и

озимой пшеницей при изменении высоты Солнца и метеорологических условий не наблюдалось.

5. При наличии «разорванной» облачности отмечаются существенные вариации пространственного распределения освещающего потока, что приводит к значительному изменению пространственного распределения отраженной радиации на маршруте.

Характеристики элементов ландшафта второго маршрута близки к характеристикам маршрута 1, поэтому они здесь не приводятся.

Реперными точками для привязки измерений были выбраны берега залива и Каховского водохранилища.

Математическая обработка информации состояла в следующем. Один из пролетов по маршруту, обычно проведенный в ясный день, принимался за эталонный. Затем для каждого спектрального интервала рассчитывались коэффициенты взаимной корреляции между данными эталонного и остальных пролетов.

Вычисления проводились по формуле [3]:

$$r_{k, k_0, m} = \frac{\sum_{i=1}^N B_i^{k, m} B_i^{k_0, m} - N \overline{B}^{k, m} \overline{B}^{k_0, m}}{\left[ \left[ \sum_{i=1}^N (B_i^{k, m})^2 - N (\overline{B}^{k, m})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^N (B_i^{k_0, m})^2 - N (\overline{B}^{k_0, m})^2 \right] \right]^{1/2}},$$

где  $m$  – номер спектрального участка (канала);  $k$  – номер пролета по маршруту;  $k_0$  – номер пролета, выбранного в качестве эталонного;  $B_i^{k, m}$ ,  $B_i^{k_0, m}$  – значения энергетической яркости в  $i$ -й точке выборки в  $m$ -м спектральном участке в  $k$ -м и эталонном пролетах соответственно;  $\overline{B}^{k, m}$  – среднее значение энергетической яркости в пределах маршрута в  $m$ -м спектральном участке в  $k$ -м пролете;  $\overline{B}^{k_0, m}$  – среднее значение яркости в пределах маршрута в  $m$ -м спектральном участке в эталонном пролете;  $N$  – количество отсчетов энергетической яркости в выборках.

Для объективной оценки условий освещения трассы для каждого пролета по данным измерений освещенности, полученными с помощью спектро радиометра, вычислялся коэффициент вариации освещающего потока  $V_k$  на рабочем участке маршрута:

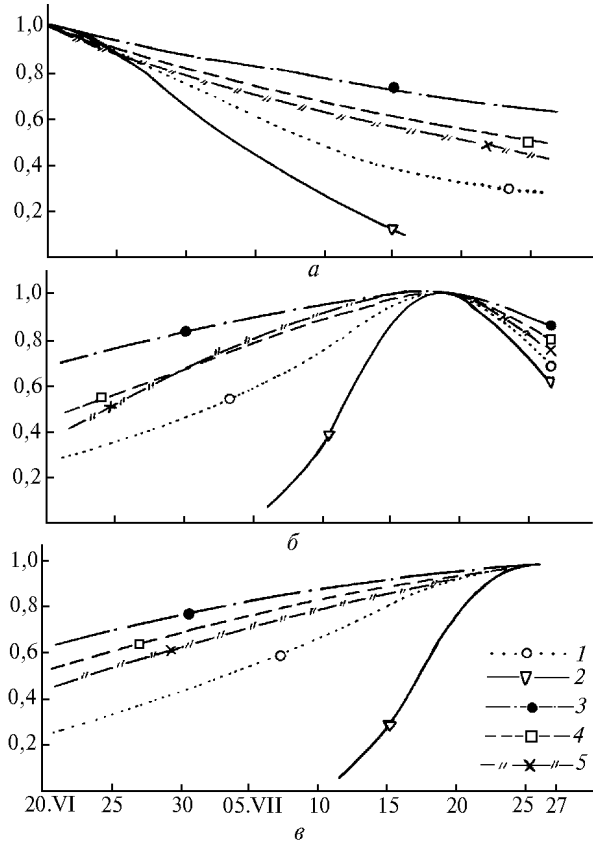
$$V_k = \frac{\left\{ \frac{1}{N-1} \left[ \sum_{i=1}^N (E_i^k)^2 - N (\overline{E}^k)^2 \right] \right\}^{1/2}}{\overline{E}^k},$$

где  $E_i^k$  – значение энергетической освещенности в  $i$ -й точке выборки в  $k$ -м пролете;  $\overline{E}^k$  – среднее значение энергетической освещенности на рабочем участке маршрута в  $k$ -м пролете.

В качестве эталонных были выбраны три пролета для каждого из маршрутов, выполненные 20 июня, 18 и 26 июля в условиях незначительной облачности при отсутствии теней от облаков на трассе съемки. Результаты обработки материалов авиационных измерений, выбранных для интервала времени от 10 до 13 ч (время московское), представлены на рисунке.

Как видно из рисунка, для 1-го и 2-го спектральных интервалов при временном смещении относительно изме-

рений эталонных реализаций корреляционные связи сильно ослабевают в течение одной декады. Ослабление заметно и для остальных спектральных интервалов. Наиболее устойчивы связи для 3-го канала (красная область спектра). Подобная тенденция изменения коэффициентов взаимной корреляции отмечена и в [3].



Зависимости коэффициентов взаимной корреляции от времени измерений для эталонов: а, б, в – 20 июня, 18 июля, 26 июля соответственно; 1 – 436 – 460; 2 – 522 – 565; 3 – 634 – 680; 4 – 762 – 822; 5 – 1045 – 1055 нм

Результаты, полученные в зависимости от высоты Солнца  $h_{\odot}$  для каждого из маршрутов и для каждого из пяти спектральных интервалов, показывают, что в интервале высот Солнца от 30 до 60° сохраняется тесная статистическая связь пространственного распределения отраженной радиации с эталонным распределением. Коэффициент корреляции превосходит, как правило, уровень 0,80–0,85. В ряде случаев при самом высоком и самом низком положениях Солнца можно отметить снижение величины  $r_{k, k_0, m}$ . Однако это снижение не носит устойчивого характера.

Облачность оказывает существенное влияние на пространственное распределение отраженной радиации в том случае, если вызывает значительное отклонение условий освещения от однородных, в частности при наличии теней от облаков на трассе съемки. При однородной освещенности вдоль трассы, даже в условиях сплошной облачности, когда земная поверхность освещается только рассеянным излучением, сохраняется тесная статистическая связь пространственного распределения отраженной радиации с эталонным распределением, полученным в условиях небольшой облачности, когда вся трасса освещается прямым солнечным светом.

Переходя к рассмотрению временных вариаций  $r_{k,k_0,m}$ , отметим, что за период наблюдений произошли значительные изменения состояния объектов: озимая пшеница на первом и четвертом полях была убрана, и во второй половине цикла наблюдений на полях была стерня, кормосмесь на поле № 2 была скошена в валки, убрана, и поле вспахано, на паровом поле № 3 в конце срока появились всходы сорняков. В состоянии леса на берегу залива заметных изменений не зафиксировано.

Таким образом, в черноземной зоне, на равнинной местности, на маршруте, включающем водную поверхность, участок леса и сельскохозяйственные поля в период, охватывающий созревание зерновых, уборку урожая и вспашку, отмечены существенные изменения в коэффициенте корреляции между реализациями

пространственного распределения отраженной радиации, полученными при различном состоянии объектов. Наибольшие изменения зафиксированы в зеленой и синей областях спектра, наименьшие – в красной и ближней инфракрасной.

В заключение рассмотрим корреляционные связи между реализациями пространственного распределения отраженной радиации в различных спектральных интервалах в пределах пролета по маршруту. Эти связи можно характеризовать корреляционной матрицей, включающей коэффициенты корреляции между всеми парными сочетаниями спектральных каналов. В табл. 3 приведены усредненные результаты расчета корреляционных матриц для трех пролетов по маршруту № 1 и для трех пролетов по маршруту № 2, выполненных при различном состоянии объектов в условиях однородного освещения.

Таблица 3

Корреляционные матрицы для пролетов по маршруту № 1 (усредненные)

Дата, время	Область спектра, нм				
	436–460	522–565	634–680	762–822	1045–1055
20 июня, 10 ч 50 мин	1,00	0,84	0,85	0,07	0,26
		1,00	0,83	0,41	0,54
			1,00	0,24	0,43
				1,00	0,94
					1,00
18 июля, 10 ч 29 мин	1,00	0,89	0,90	0,04	0,34
		1,00	0,95	0,25	0,51
			1,00	0,01	0,46
				1,00	0,90
					1,00
26 июля, 11 ч 04 мин	1,00	0,82	0,93	0,29	0,47
		1,00	0,89	0,43	0,57
			1,00	0,37	0,55
				1,00	0,94
					1,00

Из табл. 3 видно, что в эти три срока существует статистическая связь с высоким значением коэффициента корреляции ( $r \geq 0,85$ ) для всех комбинаций из трех каналов видимого диапазона спектра: синий – зеленый, синий – красный, зеленый – красный. Высокие значения коэффициентов корреляции ( $r \geq 0,91$ ) получены также для двух каналов в ближней инфракрасной области спектра: 762–822 и 1045–1055 нм. В то же время связь каналов в видимой области спектра с инфракрасными каналами сравнительно слабая, коэффициенты корреляции между этими каналами для всех рассматриваемых пролетов по маршрутам не превосходят значения 0,65.

1. Алленов М.И. Структура оптического излучения природных объектов. М.: Гидрометеиздат, 1988. 164 с.
2. Алленов М.И., Воякин С.Н., Доброзраков А.Д., Кондратьев Ю.М., Яковлев С.Г. Корреляционные связи флуктуаций яркости подстилающей поверхности в видимой и ближней инфракрасной областях спектра при различных метеорологических условиях // Труды ИЭМ. М.: Гидрометеиздат, 1989. Вып. 20(140). С. 34–45.
3. Алленов М.И., Гусев А.И., Иванова Н.П., Сулимов В.В. О вариациях спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) элементов ландшафта в диапазоне 0,4–1,2 мкм // Оптика атмосферы и океана. 1999. № 2. С. 142–145.

*M.I. Allenov, A.I. Gusev, N.P. Ivanova, and V.V. Sulimov. Aircraft investigations of landscape elements brightness correlation in some intervals of 0.4–1.2 μm range.*

The results of investigation of correlations between power brightness fluctuations recorded on the paths of 6 km length within spectral intervals with  $\lambda_{\max}$ : 445, 540, 650, 800, and 1050 nm are presented. The paths traversed the fields of cultured plants, bare fallow, water surface, forest, and so on.

Stable brightness signs of the paths under various meteorological conditions are revealed.