

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ  
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 535.24:551.521:519.23

А.А. Яковлев

**О главных компонентах вариаций спектров яркости облаков  
и земной поверхности в спектральном диапазоне 2–5,5 мкм  
при самолетных измерениях уходящего излучения**

*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова СО РАН, г. Санкт-Петербург*

Поступила в редакцию 23.05.2000 г.

Рассматриваются результаты самолетных измерений спектров излучения природных подстилающих поверхностей. Спектры измерялись с разрешением порядка 0,07 мкм в спектральном диапазоне от 2 до 5,5 мкм. Рассчитаны главные компоненты ковариационных матриц логарифмов спектральных яркостей для двух типов подстилающей поверхности – облаков и земли. Показано, что подпространства основных вариаций в спектрах обоих видов подстилающей поверхности близки между собой. Дана краткая интерпретация спектрального хода главных компонент и его связи с физическими механизмами формирования радиационного поля.

Спектры излучения природных подстилающих поверхностей в области спектра от 2 до 5 мкм формируются в результате действия различных физических факторов. При этом в рассматриваемой переходной области спектра оказывается значимым влияние как солнечного, так и теплового излучения. Сложность природы формирования спектров обуславливает целесообразность экспериментального определения основных компонент вариаций спектров.

В данной статье представлены результаты анализа данных самолетных измерений спектров природных подстилающих поверхностей с высот от 0,15 до 10 км. Экспериментальные спектры были получены с помощью самолетного спектрометра СП-102 [1] в диапазоне от 2 до 5,5 мкм со спектральным разрешением около 0,07 мкм. Спектры записывались на постоянной высоте полета над однородными (по возможности) естественными образованиями.

Многообразие и случайный характер множества факторов, определяющих спектры уходящего излучения в диапазоне 2–5 мкм, обуславливают необходимость статистического описания вариаций спектров.

В данной статье описываются результаты анализа главных компонент ковариационных матриц спектральных яркостей. При этом спектры представлялись в логарифмическом масштабе. В рассматриваемой области спектра 2–5,5 мкм динамический диапазон яркостей при спектральном разрешении 0,1 мкм охватывает несколько порядков. Использование логарифмического масштаба при анализе структуры вариаций всего спектра в целом позволяет согласовать уровни вариаций для разных длин волн, отличающиеся по абсолютным значениям на порядок, и наглядно представить вариации формы всего спектра.

Одинаковая размерность всех спектральных компонент реализации отражает специфику анализа спектральных данных и определяет возможность анализа структуры ковариаций по виду собственных векторов и по собственным числам ковариационной матрицы. При анализе мно-

гомерных данных с разной физической размерностью компонент реализации имеют смысл собственные векторы только корреляционной матрицы, а не ковариационной (см., например, [2]).

Для анализа внутренней структуры ковариаций из экспериментальных спектров были сформированы два наиболее представительных ансамбля – «облака» и «земля». Для них были рассчитаны собственные числа и собственные векторы выборочных ковариационных матриц логарифмов спектральных яркостей.

Собственные векторы ковариационной матрицы определяют некоторое направление в пространстве логарифмических спектров яркости. [По определению, собственным вектором ковариационной матрицы  $S$  называется вектор  $u$ , удовлетворяющий уравнению:  $Su = \lambda u$  ( $\lambda$  – собственное число, соответствующее вектору  $u$ )]. В рассматриваемом случае они определяют направления в 34-мерном пространстве. Основное отличительное свойство этих направлений – некоррелированность значений проекций спектров (здесь и далее спектр рассматривается в логарифмическом масштабе) на направления, соответствующие разным собственным векторам ковариационной матрицы [3]. Каждый собственный вектор ортогонален подпространству, образованному всеми остальными векторами. Собственные числа, соответствующие собственным векторам ковариационной матрицы, – это дисперсии проекций спектров на собственные векторы [3]. Для удобства векторы нормированы так, что их длина равна единице.

В табл. 1 приведены собственные числа выборочных ковариационных матриц для фоновых ансамблей «облака» и «земля». Собственные числа и соответствующие им собственные векторы упорядочены по убыванию собственных чисел.

Расчет собственных чисел и собственных векторов производился итерационным методом Хотеллинга [4], для чего была написана специальная программа [5], так

как стандартные программы расчета собственных векторов не обеспечивали необходимой точности расчетов.

Таблица 1

№ вектора	Собственные числа		Накопленная сумма			
			первых собственных чисел		как доля от следа	
	«Облака»	«Земля»	«Облака»	«Земля»	«Облака»	«Земля»
1	13,055	7,8371	13,055	7,837	0,558	0,428
2	4,9741	4,8514	18,029	12,688	0,770	0,692
3	1,4441	2,1522	19,473	14,841	0,832	0,810
4	0,9779	0,8629	20,451	15,704	0,874	0,857
5	0,7104	0,7455	21,161	16,449	0,904	0,898
6	0,5899	0,6151	21,751	17,064	0,929	0,931
7	0,4641	0,3351	22,215	17,399	0,949	0,949
8	0,2705	0,2041	22,486	17,603	0,960	0,961
9	0,2172	0,1644	22,703	17,768	0,969	0,370
10	0,1728	0,1473	22,876	17,911	0,977	0,977
11	0,0916	0,097	22,968	18,008	0,981	0,983
12	0,0825	0,072	23,050	18,080	0,985	0,987
13	0,0793	0,063	23,129	18,143	0,988	0,990
14	0,0728	0,047	23,202	18,190	0,991	0,993
15	0,0538	0,030	23,256	18,220	0,993	0,994
16	0,0345	0,0277	23,290	18,248	0,995	0,996
17	0,0243	0,0177	23,315	18,266	0,996	0,997
18	0,0201	0,0124	23,335	18,278	0,997	0,997
19	0,0157	0,0087	23,350	18,287	0,997	0,998
20	0,0130	0,0077	23,363	18,294	0,998	0,998
21	0,0078	0,0057	23,371	18,300	0,938	0,999
22	0,0073	0,0052	23,379	18,305	0,999	0,999
23	0,0064	0,0043	23,384	18,310	0,999	0,999
24	0,0050	0,0036	23,390	18,313	0,999	0,999
25	0,0044	0,0029	23,394	18,316	0,999	0,999
26	0,0036	0,0024	23,398	18,318	0,999	1,000
27	0,0029	0,0019	23,401	18,320	1,000	1,000
28	0,0038	0,0017	23,404	18,322	1,000	1,000
29	0,0021	0,0011	23,406	18,323	1,000	1,000
30	0,0017	0,0010	23,407	18,324	1,000	1,000
31	0,0014	0,0008	23,409	18,325	1,000	1,000
32	0,0011	0,0006	23,410	18,326	1,000	1,000
33	0,0009	0,0005	23,411	18,326	1,000	1,000
34	0,0007	0,0002	23,412	18,326	1,000	1,000

Сложность проведения расчетов связана с тем, что выборочные ковариационные матрицы близки к вырожденным, хотя с вероятностью единица они все же не являются таковыми [6]. Так, для «облаков» наименьшее собственное число равно 0,0007449 и составляет около шести сотых тысяч долей максимального собственного числа. Необходимость разработки специальной программы расчета собственных чисел и собственных векторов была обусловлена и большой размерностью реализаций, а следовательно, и ковариационных матриц.

Вообще заметно быстрое убывание собственных чисел с увеличением их номера (см. табл. 1). Так как собственные числа имеют смысл дисперсий значений проекций на собственные векторы и значения этих проекций для разных векторов не коррелированы, то сумма собственных чисел, или след ковариационной матрицы, служит некоторой суммарной мерой изменчивости спектров. Приведенные в табл. 1 накопленные суммы собственных чисел позволяют наглядно видеть, что существенную долю общих вариаций спектров составляют вариации в направлении лишь незначительной части из всех 34 векторов. Даже вариации значений проекций на направление одного только первого вектора составляют

55 и 43% от следа для «облаков» и «земли» соответственно. Свыше 80% суммарной дисперсии приходится на проекции всего лишь трех первых векторов. Пять первых собственных чисел составляют в сумме 90% от следа матрицы, 8 – уже 96% и свыше 99% следа составляют общие вариации в направлениях, соответствующих первым 14 векторам.

Последним векторам соответствуют очень малые дисперсии проекций реализации из выборки (см. табл. 1). Стабильность проекций на последние векторы свидетельствует об их ортогональности как к направлениям вариаций полезного сигнала, так и к направлениям вариаций шумов (следовательно, шумы коррелированы по спектру).

Первым векторам соответствуют, по-видимому, направления основных вариаций сигнала, так как средний уровень дисперсии шума (порядка 0,02) мал по сравнению с величиной первых собственных чисел и доля проекции шума на первые собственные векторы даже при сильно коррелированных шумах значительно меньше дисперсии вариаций полезного сигнала.

На рис. 1 приведены графики направляющих косинусов первых 8 векторов для ансамбля «облака», а на рис. 2 для ансамбля «земля». (Далее для краткости будем писать просто «графики векторов» или «векторы» вместо «графики направляющих косинусов векторов»). Под направляющими косинусами вектора при геометрической его интерпретации понимаются просто значения компонент, так как векторы соответствующим образом нормированы).

Из рис. 1–2 видно, что первые векторы довольно гладкие, частота осцилляций и переходов графиков через ноль возрастает с увеличением номера вектора. Каждый из векторов, как правило, не соответствует спектральному проявлению какого-либо одного определенного физического фактора, оказывающего воздействие на спектр, а является отражением совместного влияния на спектр совокупности факторов. Причиной этого является взаимосвязанность, коррелированность как самих факторов, так и их воздействий на спектр. Тем не менее некоторые векторы все же можно связать с определенным доминирующим эффектом. Первый вектор для обоих ансамблей (рис. 1,а и 2,а) отражает основные энергетические вариации в спектре, связанные преимущественно с изменением величины доходящей до прибора рассеянной солнечной радиации. Правда, даже этот основной эффект, связанный с первым вектором, несколько искажается за счет сложной взаимозависимости условий наблюдения и различного уровня дисперсий вариаций для разных длин волн [7].

Правильность такой интерпретации вида первого вектора подтверждается приведенными в табл. 2 коэффициентами корреляции проекций на первые векторы с параметрами, характеризующими условия наблюдения. В табл. 2 использованы следующие обозначения:  $H$  – высота полета;  $P$  – давление на высоте полета;  $T$  – заборная температура;  $h_{\nu}$  – угол визирования;  $h_{\odot}$  – высота Солнца;  $\varphi$  – азимут Солнца;  $\gamma$  – угол рассеяния. В частности, для облаков, которые отражают солнечную радиацию в среднем намного больше, чем остальные фоны, значение проекции спектра на первый вектор сильно (по модулю) коррелировано с величиной угла рассеяния (см. табл. 2).

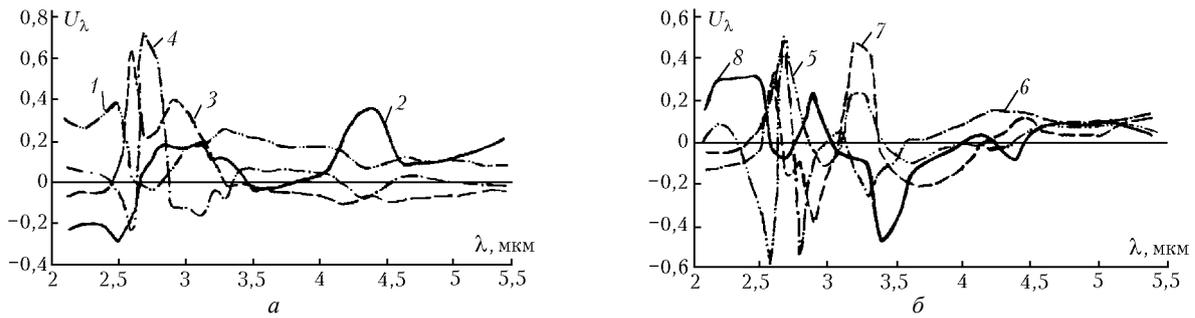


Рис. 1. Собственные векторы выборочной ковариационной матрицы логарифмов спектральных яркостей облаков. Номера кривых означают порядковый номер вектора

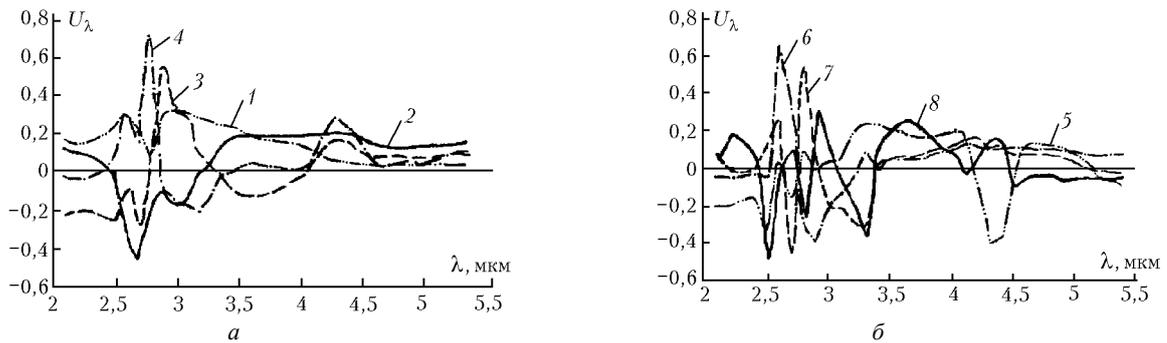


Рис. 2. Собственные векторы выборочной ковариационной матрицы логарифмов спектральных яркостей земной поверхности. Номера кривых означают порядковый номер вектора

Таблица 2

Коэффициенты корреляции проекций на собственные векторы с параметрами, характеризующими условия наблюдения

Тип фона	№ вектора	Параметр						
		$H$	$P$	$T$	$h_V$	$h_O$	$\varphi$	$\gamma$
«Облака»	1	-0,199	0,249	0,220	0,248	-0,108	0,644	-0,713
	2	-0,557	0,568	0,787	0,103	0,190	0,051	0,063
	3	-0,229	0,183	0,090	-0,187	-0,320	0,075	0,012
	4	-0,258	0,250	0,278	-0,025	-0,124	0,076	0,036
	5	0,028	-0,015	-0,020	0,048	0,003	-0,109	-0,108
	6	-0,110	0,110	0,163	-0,005	-0,027	-0,022	-0,042
	7	-0,034	0,070	0,213	-0,122	0,044	-0,086	-0,023
	8	-0,024	0,033	-0,030	-0,233	0,026	-0,051	-0,073
«Земля»	1	-0,169	0,153	0,205	-0,282	0,570	0,014	0,341
	2	-0,868	0,880	0,872	0,297	-0,273	-0,179	-0,055
	3	0,138	-0,116	-0,127	0,229	-0,212	-0,265	-0,381
	4	0,054	-0,045	-0,052	0,085	0,176	0,351	0,271
	5	0,330	-0,300	-0,359	-0,438	0,083	0,210	0,322
	6	-0,120	0,100	0,078	-0,074	0,192	-0,181	0,041
	7	0,040	-0,059	-0,027	-0,134	0,030	-0,073	-0,014
	8	0,031	-0,042	0,017	0,201	0,049	0,099	-0,064

Второй вектор для «облаков» отражает изменения теплового излучения облаков. Так как измерения проводились в основном на небольшой высоте над облаками, то забортная температура коррелирована с температурой верхней границы облака. Высота же полета и давление менее коррелированы с температурой излучающей части облака. Это различие отчетливо проявляется в повышенном значении коэффициента корреляции проекций спектра на второй вектор с температурой по сравнению с корреляцией с высотой и давлением (см. табл. 2).

В ансамбле «земля» проекция на второй вектор тоже сильно коррелирована с забортной температурой, причем корреляция с высотой и давлением не ниже, чем корреляция с температурой. Спектральный ход направляющих косинусов второго вектора для «земли» (см. рис. 2,а) существенно отличается от спектрального хода в ансамбле «облака». Причиной является то, что спектральная яркость в ансамбле «земля» зависит от высоты полета и температуры воздуха на высоте полета только в области полос поглощения атмосферных газов и склонов этих полос, так

как только в этих интервалах до прибора доходит тепловое излучение атмосферы и не доходит излучение от подстилающей поверхности. Различие вида вторых собственных векторов обеих ансамблей отражает, таким образом, различие спектральных коэффициентов корреляции логарифмов яркостей с температурой. Векторы с большими номерами уже не допускают, как правило, столь простой физической интерпретации их происхождения. Лишь для отдельных векторов спектральной ход их направляющих косинусов может быть объяснен достаточно просто.

Так, 3-й вектор в ансамбле «земля» (имеющий некоторое сходство со вторым вектором «облаков») можно интерпретировать как контраст между логарифмами яркостей в области склонов полосы поглощения водяного пара и углекислого газа 2,6–2,8 мкм и логарифмами яркостей в тепловой и коротковолновой областях.

Пятый вектор для «земли» связан, по-видимому, с контрастом между яркостями в полосе CO<sub>2</sub> 4,3 мкм и в соседних окнах относительной прозрачности. Для «облаков» в силу коррелированности заборной температуры и температуры облака этот контраст значительно слабее и потому проявляется только в 9-м и 10-м векторах. Спектральный ход их похож на спектральный ход 5-го вектора «земли». Косинусы углов между 5-м вектором ансамбля «земля» и 9-м и 10-м векторами ансамбля «облака» составили соответственно 0,528 и 0,523.

Для сопоставления основных направлений вариаций спектров в ансамблях «облака» и «земля» были рассчитаны косинусы углов между собственными векторами для этих ансамблей. В табл. 3 приведены скалярные произведения первых 8 собственных векторов ансамбля «земля» (см. рис. 2) на восемь векторов ансамбля «облака» (см. рис. 1).

Приведенные в табл. 3 числа можно рассматривать как координаты собственных векторов ансамбля «земля» в координатной системе, совпадающей с собственными векторами ансамбля «облака» (или наоборот). Из табл. 3 видно, что первые векторы обеих ансамблей очень близки (их скалярное произведение 0,814). Второй вектор «земли»

близок к 3-му вектору «облаков», а третий – ко второму (ср. рис. 1,а и 2,а).

В целом можно отметить близость подпространств, образуемых тремя первыми векторами обеих ансамблей. (Для обеих ансамблей первые три собственных числа составляют в сумме более 80% следа ковариационной матрицы). Поскольку длина каждого вектора равна единице, то сумма квадратов его направляющих косинусов в любой системе взаимно ортогональных прямоугольных координат также равна единице. Сумма квадратов первых трех направляющих косинусов 1-го вектора из ансамбля «земля» в координатах собственных векторов ансамбля «облака» составляет 0,908, т.е. этот вектор практически полностью лежит в подпространстве, образуемом первыми тремя векторами ансамбля «облака». Для 2-го и 3-го векторов ансамбля «земля» указанные суммы составили 0,607 и 0,855, что также говорит о близости подпространства первых трех векторов для обеих ансамблей.

Если рассматривать подпространство первых 8 векторов ансамбля «облака», то первые 8 векторов ансамбля «земля» практически полностью оказываются в этом подпространстве. Исключение составляет лишь 5-й вектор, который, как было отмечено ранее, близок к 9-му и 10-му векторам из ансамбля «облака».

Совпадение подпространств основных вариаций спектров обеих фонов обусловлено одинаковой физической природой и, следовательно, аналогией отклика в спектре основных факторов, влияющих на спектр.

Результаты анализа свидетельствуют об ограниченности области вариаций спектральных яркостей в многомерном пространстве и о близости этих областей для разных фонов. Это может оказаться существенным при разработке способов сокращенного описания спектров.

В заключение еще раз следует подчеркнуть, сколь существенное значение для анализа структуры ковариаций имеет масштаб представления спектрофотометрических данных. Именно использование логарифмического масштаба позволило исследовать структуру вариации формы спектра.

Таблица 3

Скалярные произведения собственных векторов выборочных ковариационных матриц логарифмов спектральных яркостей облаков и земной поверхности

Тип фона	№ вектора	«Облака»							
		1	2	3	4	5	6	7	8
«Земля»	1	0,814	0,450	-0,206	-0,029	0,025	-0,07	0,049	0,224
	2	0,095	0,272	0,724	0,322	0,359	0,267	0,123	-0,207
	3	0,511	-0,715	0,288	0,161	-0,277	0,015	0,002	0,001
	4	0,067	-0,266	-0,382	0,458	0,661	-0,056	0,313	-0,070
	5	0,114	0,087	0,067	-0,248	0,037	-0,206	-0,060	-0,464
	6	0,031	0,025	-0,384	0,249	-0,157	0,686	0,375	-0,196
	7	-0,125	0,270	0,048	0,690	-0,471	-0,262	-0,190	0,080
	8	0,111	0,170	0,006	-0,122	-0,072	0,249	-0,655	-0,194

Дисперсии же абсолютных спектральных яркостей пропорциональны средним яркостям в силу логарифмически нормального закона распределения спектральных яркостей (см. [8–10]). Поэтому анализ вариаций непосредственно яркостей приводит к тривиальному выводу, что основные вариации сосредоточены в той области спектра, где велики средние яркости. В частности, дисперсия проекций спектра яркости в линейном масштабе на направление первого вектора для ансамбля «облака» составляет 94,4% от следа. Направляющие же косинусы первого вектора пропорциональны среднему

спектру. Таким образом, при рассмотрении вариаций абсолютных спектральных яркостей использование метода главных компонент позволяет получить информацию практически только об интегральных характеристиках спектра яркости.

Подобная ситуация, по-видимому, типична для анализа спектральных данных довольно разнообразной природы, что подтверждается многочисленными работами по анализу собственных векторов ковариационных матриц (см., например, [11–13]). Во всех указанных работах отмечено, что почти вся дисперсия в спектре связана лишь с

вариациями в направлении одного – двух собственных векторов ковариационной матрицы.

Выбор логарифмического масштаба измерения яркостей обусловил в нашем случае возможность осмысленного анализа структуры спектральных ковариаций, в частности с помощью расчета собственных чисел и собственных векторов ковариационных матриц.

Структура ковариаций оказалась физически содержательной, что позволяет рассматривать возможности использования этой структуры для различных прикладных целей, например для построения имитационной модели спектров яркости природных подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн 2–5,5 мкм.

1. *Попов О.И., Федорова Е.О.* Измерения спектров излучения атмосферы и земной поверхности в области 2–6 мкм с высот до 4 км // *Оптика и спектроскопия*. 1965. Т. 18. № 3. С. 512–514.
2. *Till K., Colley H.* Thoughts on use of principal component analysis in petrogenetic problems // *J. Int. Assoc. Math. Geol.* 1973. V. 5. N 4. P. 341–350.
3. *Андерсон Т.* Введение в многомерный статистический анализ. М.: Физматгиз, 1963. 500 с.
4. *Hotelling H.* Analysis of a complex of statistical variables into principal components // *J. Educ. Psych.* 1933. V. 24. P. 417–441, 498–520.

5. *Яковлев А.А.* Программы первичной статистической обработки спектрофотометрических данных: Сб. программ. Вып. 1. Л.: ГОИ, 1973. 182 с.
6. *Gupta S.D.* Nonsingularity of the sample covariance matrix // *Sankhya*. 1971. V. A33. N 4. P. 475–478.
7. *Яковлев А.А., Попов О.И., Веселов Д.П.* Вариации спектров природных подстилающих поверхностей в области спектра 2–5,5 мкм // *Оптический журнал* (в печати).
8. *Яковлев А.А.* О связи ковариаций и корреляций спектральных и интегральных яркостей природных объектов с ковариациями логарифмов яркостей // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1975. Т. 11. № 6. С. 639–642.
9. *Яковлев А.А.* О распределении вероятностей спектральных яркостей облаков // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1973. Т. 9. № 3. С. 318–321.
10. *Яковлев А.А.* К проверке гипотез о законе распределения вероятностей для яркостей однородных природных образований // *Исследование Земли из космоса*. 1982. № 4. С. 59–65.
11. *Grum F., Wightman T.* Measurement of the contribution of fluorescence to the brightness of papers treated with whitening agents // *Tappi*. 1960. V. 43. P. 400.
12. *Simonds J.L.* Application of Characteristic vector analysis to photographic and optical Response data // *JOSA*. 1963. V. 53. N 8. P. 968–974.
13. *Condit H.R.* Application of characteristic vector analysis to the spectral energy distribution of daylight and the spectral reflectance of American soils // *Appl. Opt.* 1972. V. 11. N 1. P. 74–86.

***A.A. Yakovlev. On main components of variations of radiance spectra of clouds and earth surface in a spectral range of 2–5,5 microns at aircraft measurements of outgoing radiation.***

The results of aircraft measurements of radiance spectra of natural surfaces are considered. The spectra were measured with the resolution of the order of 0.07 microns in a spectral range from 2 to 5.5 microns. The main components of covariance matrixes of the logarithms of spectral radiances are designed for two types of underlying surface: clouds and ground. It is shown, that subspaces of the main variations in spectra of both kinds of background are close to each other. The brief interpretation of spectral behaviour of the main components and its correlation with physical mechanisms of a radiation field formation is presented.