

А. А. БУЗНИКОВ, П. И. КЛИМУК, член-корреспондент АН СССР К. Я. КОНДРАТЬЕВ,
В. В. ЛЕБЕДЕВ, В. М. ОРЛОВ

СПЕКТРОФОТОМЕТРИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ С ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ «СОЮЗ-13»

Изучение спектральных характеристик Земли и ее атмосферы на «Союзе-13» явилось продолжением программы исследований, выполненных ранее на пилотируемых космических кораблях «Союз» и «Салют» (¹). Она включает спектрографирование сумеречного и дневного горизонтов Земли, а также различных типов природных образований.

На «Союзе-13» установлена усовершенствованная модель ручного спектрографа РСС-2М, созданная с учетом предшествующего опыта работы аппаратуры РСС-2 на пилотируемых космических кораблях (^{2, 3}): в кинематику прибора введен кнопочный спуск, уменьшена продолжительность экспозиции до $\frac{1}{60}$ сек. (по сравнению с $\frac{1}{8}$ сек. в РСС-2 на «Союзе-9») и установлены специальные реперные устройства для повышения точности спектральной и пространственной привязки спектрограмм.

Для калибровки прибора во время полета в его оптическую схему перед входной щелью введен фотометрический клин. При определении абсолютных значений яркости случайную ошибку удалось уменьшить до 5%.

Методика спектрографирования сумеречного, дневного горизонтов Земли и природных образований на ее поверхности в основном соответствовала ранее описанной (^{1, 2}). Некоторые изменения связаны с тем, что основная часть экспериментов с прибором РСС-2М на «Союзе-13» проводилась во время «закрутки» корабля вокруг оси, направленной в сторону Солнца. В этом случае в иллюминатор, направленный в сторону Солнца, космонавт имел возможность без дополнительной ориентации корабля наблюдать и спектрографировать сумеречный ореол Земли при восходе и заходе Солнца в области его максимальной яркости. В режиме «закрутки» на дневной стороне Земли при всех высотах Солнца имелась возможность через боковой иллюминатор фиксировать дневной горизонт с азимутом относительно направления на Солнце, близким к 90° (⁴). Оказалось также возможным использовать боковой иллюминатор для спектрографирования земной поверхности при различных углах визирования, кроме надира. Визирование подстилающей поверхности в зоне надира было возможно только в районах, близких к терминатору, где освещенность поверхности минимальна. В связи с этим во время полета «Союза-13» спектры природных образований были получены при углах визирования (относительно надира) от 26° и больше.

Обработка спектрограмм проводилась на микрофотометре прямых интенсивностей, который путем сравнения исследуемой и эталонной спектрограмм автоматически пересчитывал плотности почернения негатива в спектральную яркость фотометрируемого объекта. В качестве эталонных спектрограмм использовались спектры Солнца, зарегистрированные РСС-2М во время полета через диффузно пропускающий молочный светофильтр. Эталонная спектрограмма, полученная при введенном перед входной щелью спектрографа фотометрическом клине, моделировала гетерохромные характеристические кривые используемой фотопленки. Спектральный диапазон измерений РСС-2М составлял 400—700 нм, спектральное разрешение 45 Å. Фокусное расстояние входного объектива 135 мм.

Спектральные и пространственные характеристики поля яркости Земли вблизи горизонта зависят от состава и структуры атмосферы, условий

освещения Солнцем и других факторов. Полученные на «Союзе-13» данные о поле яркости в зоне дневного и сумеречного горизонтов Земли представляют интерес прежде всего в связи с возможностью их использования для определения вертикальной оптической структуры верхней тропосферы и стратосферы⁽¹⁰⁾.

Спектрографирование дневного горизонта было проведено 21 XII 1973 г. на 50-м витке полета с $16^h38^m08^s$ до $16^h43^m06^s$, когда космический корабль «Союз-13» находился над южной частью Атлантического океана. За это время получено 27 кадров. Высота Солнца для подспутниковой точки изменялась от $7,045^\circ$ до $25,366^\circ$; угол рассеяния в точке наблюдения для всех кадров около 90° .

В качестве примера приведем результаты обработки одного из кадров спектрографа с фотографией и спектрограммой дневного горизонта. На фотографии видно, что поверхность океана закрыта облачностью. Поэтому истинную линию горизонта установить не удастся. У горизонта видна лишь верхняя граница облаков, высота которой в данном случае составляет 5 ± 2 км. С учетом этого были определены высоты перигея линии визирования h_p для кривых спектрального хода яркости дневной атмосферы, представленных на рис. 1. Из рис. 1 видно, что для кривой 1 максимум яркости приходится на длину волны 450 нм. С увеличением высоты положение максимума смещается в сторону более коротких волн. На приведенных кривых наблюдается слабо выраженный минимум яркости вблизи $\lambda = 600$ нм, обусловленный полосой поглощения озона. Для больших h_p этот минимум проявляется сильнее.

Спектрографирование сумеречного горизонта проводилось 22 XII 1973 г. на 66, 67 и 70 витках. Получено 12 кадров, пригодных для микрофотометрической обработки. Для каждого кадра определены угол погружения Солнца под горизонт δ_0 и азимут φ относительно направления на Солнце. Получены спектры сумеречного ореола для углов погружения Солнца под горизонт от $0,08$ до $3,12^\circ$ и азимутов φ , близких к 0° . На рис. 2 представлены результаты обработки одного из кадров сумеречного ореола. Спектрограммы обрабатывались на микрофотометре с шагом по высоте спектра 1,3 км, а по длине волны 5 нм. В отличие от обработки данных, полученных на КК «Союз-5» и «Союз-7», когда впервые были зафиксированы спектры сумеречного ореола^(2, 6), микрофотометрирование проводилось не по высоте щели, а по направлению дисперсии для отдельных высот перигея линии визирования. Это стало возможным в связи с введением реперных отметок, позволяющих точно определять на спектрограмме не только спектральный диапазон, но и направление дисперсии. Высотная привязка кривых спектрального хода яркости сумеречного ореола земной атмосферы осуществлялась по фотоизображению ореола с абсолютной ошибкой определения нулевого уровня порядка 2 км.

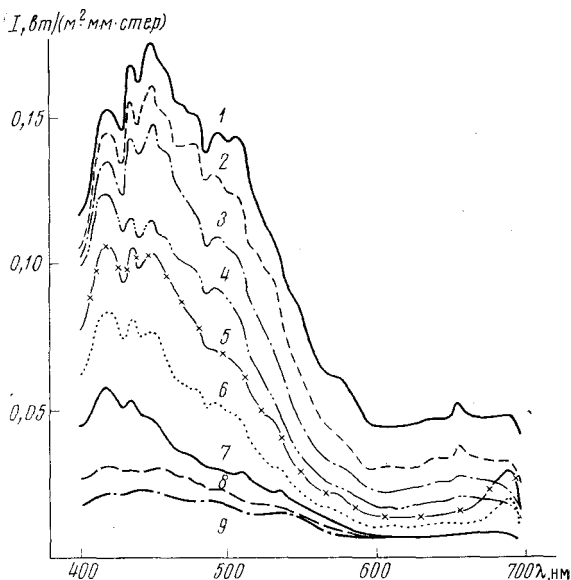


Рис. 1. Спектральные яркости дневного горизонта Земли над южной частью Тихого океана (кадр 13 106, $H_{\text{орб}}=266$ км, высота Солнца над горизонтом $\theta=10^\circ$, азимут относительно Солнца $\varphi=90^\circ$) для различных высот перигея h_p (км) линии визирования: 1 — 8; 2 — 10,7; 3 — 13,3; 4 — 15,9; 5 — 19; 6 — 27; 7 — 31; 8 — 36; 9 — 40

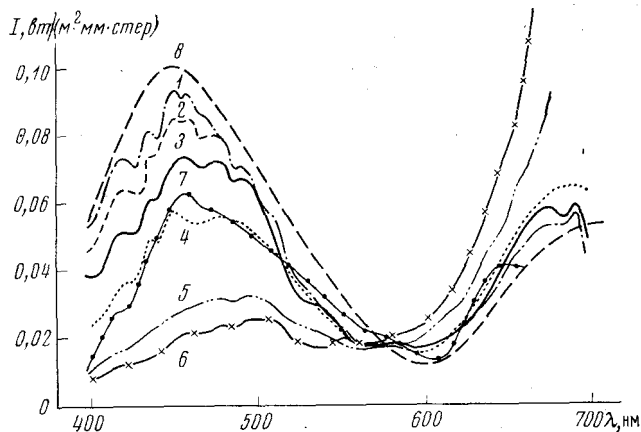


Рис. 2. Спектральный ход яркости сумеречного ореола земной атмосферы для различных высот перигея h_p (км) линии визирования: 1 — 22,6; 2 — 21,3; 3 — 20; 4 — 18,6; 5 — 16; 6 — 14,6; 7 — 19,8. 1–6 — кадр 13 249, $\delta_{\odot}=0,3^{\circ}$, $\varphi=0,44^{\circ}$, $H_{орб}=260$ км. 7 — «Союз-5», кадр 14, $\delta_{\odot}\approx 1,5^{\circ}$, $\varphi=2,4^{\circ}$, $H_{орб}=252$ км. 8 — теоретический расчет. Модель Элтермана (⁸), однократное рассеяние. $H_{орб}=250$ км, $\delta_{\odot}=0^{\circ}$, $\varphi=8^{\circ}$, $h_p=20$ км

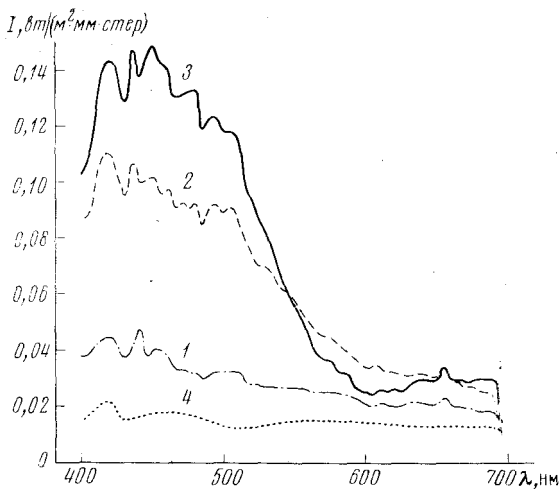
Анализируя кривые на рис. 2, можно отметить следующее. При высоте перигея линии визирования $h_p=22,6$ км максимум спектральной яркости сумеречного ореола приходится на длину волны 450 нм. По мере уменьшения h_p максимум смещается в сторону более длинных волн. Наблюдается минимум яркости при $\lambda=570-600$ нм, обусловленный поглощением озона в полосе Шайнон. Глубина этого минимума зависит от высоты рассматриваемого слоя атмосферы. Это открывает возможность использовать спектры сумеречного ореола для глобального изучения вертикального распределения озона.

На этом же рисунке для сравнения нанесены кривые 7 и 8. Кривая 7 получена по данным «Союза-5» при $H_{орб}=252$ км, $\delta_{\odot}\approx 1,5^{\circ}$, $\varphi=2,4^{\circ}$ и $h_p=19,8$ км. Кривая 8 взята из (¹) и представляет собой результат теоретического расчета, выполненного для однократного рассеяния и модели Элтермана (⁸). Сравнение результатов спектрографирования сумеречного ореола с «Союза-13» с данными «Союза-5» и теоретическими расчетами показывает их качественное соответствие.

Кривые 5 и 6 на рис. 2 по спектральному ходу отличаются от остальных. В этих случаях наблюдается резкое возрастание значений спектральной яркости при $\lambda 640-700$ нм. Это связано с тем, что рассматриваемые данные получены при микрофотометрировании участка спектрограммы, расположенного в непосредственной близости от края солнечного диска, появившегося из-за горизонта. Практически они соответствуют прямому солнечному излучению, ослабленному большой толщиной атмосферы.

Возможность экспериментального определения передаточных функций системы «атмосфера — подстилающая поверхность» на основе совмещенного подспутникового эксперимента над выбранными ключевыми участками была впервые реализована в (^{2, 3, 9, 10}). Теоретическое решение соответствующих задач дано в (^{11, 12}). Комплексное изучение проблемы в плане детального сопоставления теоретических и экспериментальных значений передаточных функций проведено в (¹³). В этих работах показано, что совмещенный подспутниковый эксперимент, предусматривающий синхронную съемку оптических характеристик выбранного участка поверхности из космоса и с низко летящего самолета, является наиболее совершенным методом для экспериментального определения передаточной функции атмосферы. Однако его проведение связано с рядом технических и организацион-

Рис. 3. Спектральные яркости поверхности Земли и ее атмосферы при наблюдении из космоса под различными углами визирования θ . 1 — «Союз-13» кадр 13 170, долина реки Маханди (Индия), $\theta=46^\circ$, высота Солнца $\theta=44,2^\circ$, $\varphi=33^\circ$; 2 — «Союз-13», кадр 13 161, побережье Бенгальского залива (Индия), $\theta=64^\circ$, $\theta=48,8^\circ$, $\varphi=87^\circ$; 3 — «Союз-13», кадр 13 106, дневной горизонт, $\theta=10^\circ$, $\varphi=90^\circ$; 4 — «Союз-9», кадр 250, побережье Каспийского моря, $\theta=10^\circ$, $\theta=56^\circ$



ных трудностей. Дополнительные возможности для изучения влияния толщи атмосферы на солнечное излучение, отраженное различными типами природных образований на поверхности Земли, дает планомерно-перспективная съемка ее отдельных участков или последовательная съемка одного участка поверхности под разными углами визирования при движении космического корабля по орбите.

В качестве иллюстрации возможности использования данного метода для оценки влияния атмосферы на рис. 3 приведены несколько спектров отражения отдельных участков подстилающей поверхности, снятых при различных углах визирования θ . Спектры 1 и 2 получены на 78 витке полета «Союза-13», когда космический корабль пролетал вдоль восточного побережья Индии. На рис. 3 нанесены также спектр атмосферной дымки у дневного горизонта (кривая 3) и спектр подстилающей поверхности, снятый почти в надир во время полета «Союза-9» (кривая 4). Для кривых 1, 2 и 4 атмосферная масса на пути отраженного луча соответственно равна $m_1=1,44$, $m_2=2,28$, $m_4=1,03$. Приведенные на рис. 3 спектры отражения относятся к различным подстилающим поверхностям. Поэтому проводить их количественное сравнение для определения передаточной функции системы «атмосфера — подстилающая поверхность» не представляется возможным. Однако они наглядно демонстрируют влияние атмосферной дымки на спектр подстилающей поверхности при изменении угла визирования θ .

В заключение необходимо отметить, что полученные на «Союзе-13» результаты измерений отраженного и рассеянного системой Земля — атмосфера солнечного излучения открывают возможности дальнейшей разработки методов решения обратных задач атмосферной космической оптики.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

Поступило
12 XII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Исследования природной среды с пилотируемых орбитальных станций, К. Я. Кондратьев (ред.) Л., 1972. ² К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников и др., ДАН, т. 195, № 5 (1970). ³ К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников и др., Космические исследования, т. 10, в. 2 (1972). ⁴ «Салют» на орбите, М. П. Васильев (ред.), М., 1973. ⁵ А. А. Бузников, К. Я. Кондратьев и др., Космические исследования, т. 10, в. 1 (1972). ⁶ К. Я. Кондратьев, Б. В. Воинов и др., Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, т. 6, № 4 (1970). ⁷ L. Elterman, Visible and IR Attenuation for Altitude to 50 km, AFCSRL-68-0153, Envir. Res. Paper, № 285, 1968. ⁸ К. Я. Кондратьев, А. А. Григорьев и др., Космическая дистанционная индикация малых газовых и аэрозольных компонент атмосферы, Л., 1974. ⁹ К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников и др., ДАН, т. 197, № 5 (1971). ¹⁰ К. Я. Кондратьев, А. А. Кузников и др., Проблемы физики атмосферы, в. 10, 3 (1972). ¹¹ К. Я. Кондратьев, О. И. Смоктий, ДАН, т. 206, № 5 (1972). ¹² К. Я. Кондратьев, О. И. Смоктий, ДАН, т. 206 № 6 (1972). ¹³ К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников и др., Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, № 6 (1974).