

М. В. АХМАНОВА, Б. В. ДЕМЕНТЬЕВ, А. В. КАРЯКИН,
М. Н. МАРКОВ, М. М. СУЩИНСКИЙ

ОТРАЖЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕГОЛИТОМ МАТЕРИКОВОЙ И МОРСКИХ ОБЛАСТЕЙ ЛУНЫ

(Представлено академиком А. П. Виноградовым 4 XI 1972)

1. Инфракрасная спектроскопия лунного грунта может служить весьма эффективным средством изучения его физических свойств, молекулярного состава и т.п. При исследовании верхнего слоя грунта (реголита), который, как известно, характеризуется сильной степенью раздробленности и поверхностными явлениями (слипание, электризация и т.п.), представляется перспективным метод отражения. В этом случае вещество реголита претерпевает минимум изменений в процессе исследования и может быть изучено в условиях, близких к условиям естественного залегания. Кроме того, спектры отражения могут быть получены дистанционно для Луны в глобальном масштабе ⁽¹⁾.

Применение метода отражения связано с необходимостью детального изучения как эффекта рассеяния, так и эффекта поглощения. Проблемой является разделение этих эффектов в наблюдаемых экспериментально отражательных характеристиках. Это в особой степени относится к реголиту, так как в данном случае оказалось, что константы рассеяния и поглощения в и.-к. области спектра имеют один порядок величины ⁽²⁾.

2. Для исследования характеристик реголита методом отражения была разработана установка, включающая осветитель, призмный (NaCl) монохроматор и фотосопротивление из германия, легированного ртутью, охлаждаемое жидким гелием. Установка позволяла регистрировать независимо индикатрисы рассеяния с разрешением по углу до 1° в пределах углов $0-75^\circ$ и альбедо с помощью интегрирующей сферы. Таким образом, можно было получать параметры, характеризующие рассеяние (индикатрисы) и полное поглощение в области спектра $1,8-13 \mu$.

Исследовались отражательные характеристики реголита материковой области, доставленного автоматической межпланетной станцией (АМС) «Луна-20» из района, находящегося между морем Изобилия и морем Кризисов, а также морских областей из материалов, доставленных АМС «Луна-16» (море Изобилия) и экспедициями «Аполлон 11» (море Спокойствия) и «Аполлон 12» (океан Бурь). Там, где была возможность, для изучения отбиралась фракция, соответствующая верхней поверхностной части пробы грунта. Основная масса материала состояла из частиц произвольной формы со средними размерами $50-80 \mu$. Однако преобладают более мелкие частицы (до 5μ), покрывающие грани крупных частиц ⁽³⁾. Образцы весили от 110 до 360 мг. Материал свободно насыпался в открытую кювету, образуя слой толщиной ~ 1 мм. Кроме лунного грунта исследовались некоторые земные материалы: образцы пород типа базальтов (океанический из Тихого океана и материковый с Кольского полуострова), анортозит (Восточная Сибирь), ряд минералов.

3. На рис. 1 показаны спектры отражения всех исследовавшихся образцов лунного грунта, полученные с интегрирующей сферой. Здесь же приведены предельные кривые спектра отражения из астрономических измерений ⁽¹⁾, а также опубликованные ранее спектры отражения грунта, доставленного экспедициями «Аполлон 11» и «Аполлон 12» в коротковолно-

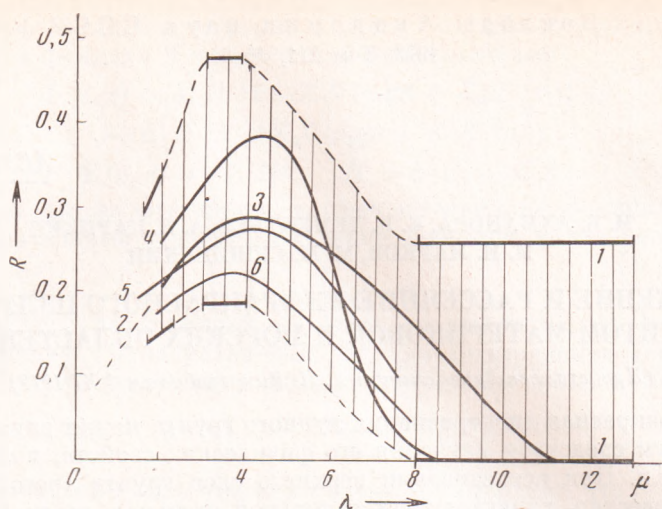


Рис. 1. Спектральный ход альbedo лунных образцов. 1 — астрономические данные ⁽¹⁾; 2 — данные ^(4, 5); 3—6 — реголит: 3 — «Луна-16», 4 — «Луна-20», 5 — «Аполлон 11», 6 — «Аполлон 12»

вом диапазоне ($\lambda < 2,5 \mu$) ^(4, 5). Спектр отражения материкового реголита имеет максимум в области 4μ , где коэффициент отражения равен 0,37. Максимумы отражения образцов из морских районов располагаются в области $4,5 \mu$, с коэффициентом отражения соответственно для «Луны-16» 0,29, «Аполлон 11» 0,27, «Аполлон 12» 0,21. Обращает на себя внимание подобный ход спектров отражения морского реголита, большее значение отражательной способности у материкового реголита, а также более резкое падение отражения в диапазоне $\lambda > 4,5 \mu$ у реголита материка по сравнению с реголитом морей. Как материковые, так и морские спектры в общем согласуются с астрономическими измерениями. Таким образом, впервые астрофизические данные были подтверждены непосредственными лабораторными исследованиями.

Происхождение весьма высокого отражения в области спектра $3-5 \mu$ было проанализировано в ⁽²⁾. Установлено, что оно соответствует участку спектра наибольшей прозрачности материала реголита. Уменьшение отражения в коротковолновой области связано с увеличением поглощения ионами металлов (железо, титан), их электронными полосами, а в длинноволновой области — с поглощением связи Si — O (колебательная полоса). Большее отражение материка, таким образом, связано с меньшим количеством окрашивающих центров.

На рис. 2 приведены индикатрисы рассеяния материкового и морского реголитов, а также анортита и оплавленного (с большим количеством сфероидов) базальта, полученные для трех длин волн. В ⁽²⁾ было показано, что характер рассеяния реголита морского района отличается от характера рассеяния земных пород наличием более резко выраженного эффекта обратного рассеяния при углах наблюдения, близких к углам освещения. Как видно из рис. 2, для материкового реголита этот эффект еще заметнее. Кроме того, индикатрисы по-разному изменяются с длиной волны для грунта «Луны-16» и «Луны-20». Обратное рассеяние в первом случае больше в коротковолновой области, в то время как во втором случае оно больше в длинноволновой области. Возможно, это связано со значительно большей величиной коэффициента поглощения грунта «Луны-20» в области $\lambda > 4 \mu$, что может привести к проявлению «металлического» характера отражения и повлиять на вид индикатрисы. В общем объяснение эффекта обратного рассеяния лунного грунта пока не дано. Однако вряд ли он связан с нали-

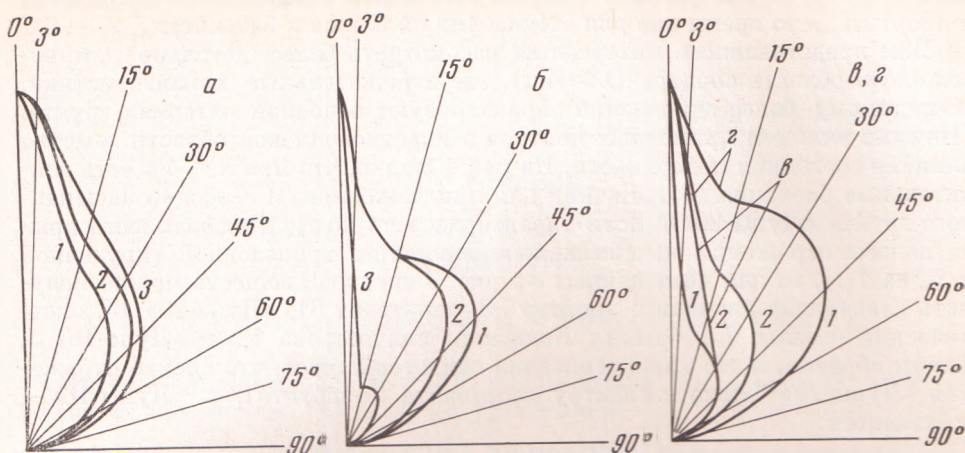


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния: а, б — образцы, доставленные АМС «Луна-16» (а) и «Луна-20» (б); в, г — базальт (остеклованный) (в) и анортит (г). 1 — 2,2, 2 — 4,5, 3 — 7,2 μ

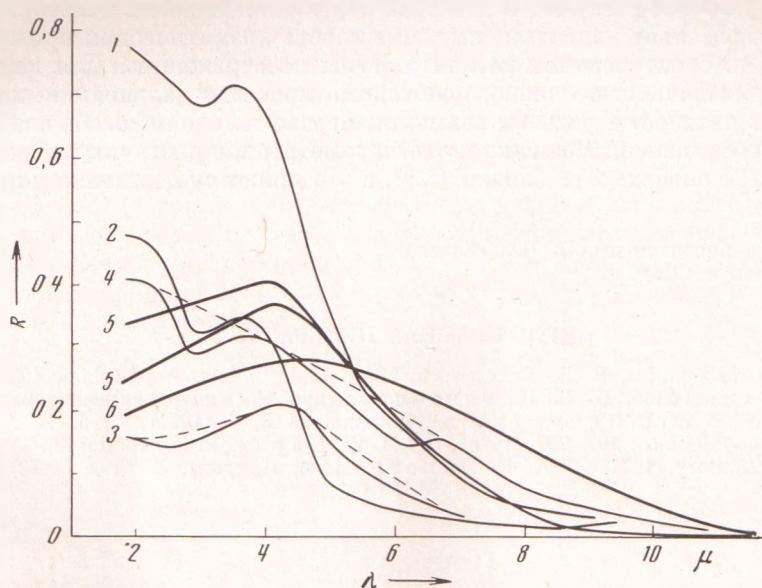


Рис. 3. Спектральный ход альbedo земных образцов и реголита: 1 — анортит; 2 — анортозит (Восточная Сибирь); 3 — базальт океанический; 4 — базальт Кольского полуострова; 5, 6 — реголит, 5 — «Луна-20» (5 (верхняя кривая) — свободно насыщенный, 5 — пригlaженный грунт), 6 — «Луна-16»

тием оплавленных частиц, как было предположено нами ранее ⁽²⁾. Известно, что в реголите, доставленном АМС «Луна-20», оплавленных частиц существенно меньше, чем в реголите «Луны-16», тем не менее обратное рассеяние выше.

Весьма характерно различие величины и спектрального хода альbedo материковой и морских областей Луны. Для интерпретации его были проведены исследования отражательных свойств ряда земных материалов.

На рис. 3 приведен спектральный ход альbedo анортита, анортозита, океанического базальта, базальта Кольского полуострова, а также образцов, доставленных «Луной-16» и «Луной-20». Как видно, качественно ход

спектров отражения реголита «Луны-20» ближе к спектрам анортозита и анортита, в то время как для «Луны-16» он ближе к базальтам.

Нам представлялось интересным рассмотреть более детально длинноволновую область спектра ($\lambda > 4 \mu$), где отражательные характеристики, по-видимому, более однозначно характеризуют основной материал грунта. (Помимо влияния примесных центров в коротковолновой области заметно влияние состояния поверхности. Из рис. 3 видно, что при $\lambda < 4 \mu$ есть значительные различия в отражении для пригласенного и свободно насыпанного грунта «Луны-20».) Если характеризовать ход длинноволнового крыла полосы отражения максимальным значением производной (крутизной в % на 1μ), то для помещенных на рис. 3 спектров веществ можно получить следующие значения: анортит 38, анортозит 31, «Луна-20» 14, океанический базальт 7,5, базальт Кольского полуострова 5,5 и «Луна-16» 5. Таким образом, и эта характеристика свидетельствует, что спектр отражения «Луны-20» ближе к спектру анортозита (анортита), а «Луны-16» — к базальтам.

Рентгеноструктурным, химическим и минералогическим анализом было установлено, что морской реголит образован из пород типа базальтов, а материковый — из анортозита (состоящего в большей степени из анортита) (⁶). Таким образом, и-к. спектры отражения находятся в соответствии с данными, полученными другими методами.

Обнаруженное различие в спектрах отражения морских и материкового образцов позволяет надеяться на возможность аналитических применений метода и-к. спектроскопии реголита Луны по отражению. Для количественной однозначности, однако, необходимо провести дальнейшие исследования и, в частности, расчеты величины отражательной способности с учетом размеров частиц. Возможно, что параметры микроструктуры реголита всей лунной поверхности близки (³, ⁶), а это может существенно упростить ситуацию.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР
Москва

Поступило
23 X 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. Н. Марков, В. Л. Хохлова, *Moon and Planets*, Amsterdam, 1967, p. 53.
² М. В. Ахманова, Б. В. Дементьев и др., *Космические исследования*, 10, 423 (1972). ³ А. П. Виноградов, *Природа*, № 3, 8 (1971). ⁴ J. B. Adams, R. L. Jones, *Science*, 167, 737 (1970). ⁵ B. W. Napke, *Proc. Apollo 12, Sec. Lunar Sci Conf.*, January, 1971. ⁶ А. П. Виноградов, *Природа*, № 8, 2 (1972).