

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЛУНЫ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

М. Н. Наугольная

По результатам наблюдений вычислены углы падения и отражения лучей для 101 детали лунной поверхности. Построены кривые изменения «показателя цвета» этих деталей в зависимости от угла падения лучей. Для некоторых деталей наблюдается изменение хода этих кривых в инфракрасной области спектра по сравнению с синей областью — преимущественно на послеполуденной части кривой. Проведено сравнение «синих» и инфракрасных снимков Луны, полученных методом контрастной перепечатки, и объясняются их различия.

On the basis of our observational data the angles of incidence and reflection of light rays for 101 features of the lunar surface are calculated. Variation curves of «color indices» of these features are plotted as a function of the angle of incidence of light rays. For some features a change in shape of the curves in the infrared range as compared with the blue range of spectrum is evident mostly in the afternoon part of a curve. A comparison is made between «blue» and infrared photographs of the Moon obtained by using the contrast printing technique and differences between them are explained.

Последние годы ознаменовались интенсивным исследованием Луны при помощи различных космических аппаратов. На поверхности Луны уже побывал человек. Собраны первые коллекции лунных минералов. Получены снимки Луны с близкого расстояния с большим разрешением. Тем не менее наземные наблюдения Луны еще не утратили своей актуальности. Они по-прежнему могут давать ценные сведения, характеризующие лунную поверхность в целом.

В данной статье излагаются результаты изучения Луны в синей ($\lambda_{эфф} = 430$ мкм) и инфракрасной ($\lambda_{эфф} = 920$ мкм) областях спектра. Методика наблюдений и их обработки изложены в нашей предыдущей статье [1]. Наблюдательный материал получен в ГАО АН СССР в 1964—1969 гг. на менисковом телескопе системы Д. Д. Максудова (МТМ-500) для 57 углов фазы Луны от -140.9 до $+120.6$. Для изучения была отобрана 101 деталь лунной поверхности.

Для каждого изучавшегося участка Луны нами вычислены углы падения i и отражения ϵ лучей по формулам

$$\cos i = \sin b_{\odot} \sin \varphi + \cos b_{\odot} \cos \varphi \sin [(90^{\circ} - l_{\odot}) + \lambda], \quad (1)$$

$$\cos \epsilon = \sin b \sin \varphi + \cos b \cos \varphi \cos (\lambda - l), \quad (2)$$

где φ и λ — селенографические координаты изучавшихся участков Луны, b_{\odot} и b — селенографические широты Солнца и Земли, $(90^{\circ} - l_{\odot})$ — дополнение до селенографической долготы Солнца и l — селенографическая долгота Земли. Значения b_{\odot} , b , $(90^{\circ} - l_{\odot})$ и l взяты из астрономических ежегодников СССР на 1964—1969 гг.

Для групп деталей Луны нами построены графики зависимости величины $\Delta = \lg\left(\frac{B_c}{B_{\text{ИК}}}\right)$ от угла падения лучей i . Значения этой величины, в которой B_c — яркость в синей, а $B_{\text{ИК}}$ — в инфракрасной области спектра, были определены в [1]. При построении этих кривых по оси абсцисс откладывались углы падения лучей i (отрицательные значения i соответ-

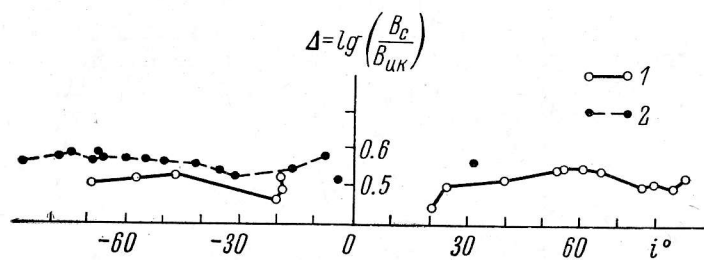


Рис. 1. Типичный ход зависимости «показателя цвета» $\Delta = \lg\left(\frac{B_c}{B_{\text{ИК}}}\right)$ от угла падения лучей i для изученных деталей Луны.

Приведены кривые для двух материковых участков: 1 — для детали № 1, при $\epsilon = 78^\circ 1$, 2 — для детали № 100, при $\epsilon = 77^\circ 9$.

ствуют дополуночной, положительные — послеполуночной части кривой), а по оси ординат — величина $\Delta = \lg\left(\frac{B_c}{B_{\text{ИК}}}\right)$. Для каждой кривой приводится также угол отражения лучей ϵ для угла фазы Луны, близкой к полнолуннию, когда i почти равняется ϵ .

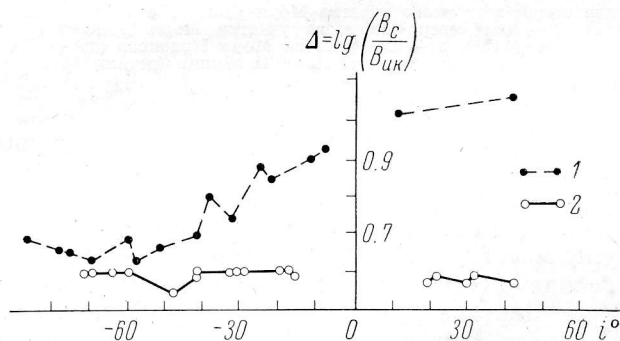


Рис. 2. Ход зависимости «показателя цвета» Δ от угла падения i .

1 — для материкового участка около кратера Гримальди (деталь № 101, при $\epsilon = 72^\circ 5$), 2 — для участка юго-восточного края Луны (деталь № 82, при $\epsilon = 44^\circ 7$).

Анализ этих кривых показал, что для большинства изученных деталей Луны изменение величины $\Delta = \lg\left(\frac{B_c}{B_{\text{ИК}}}\right)$ — этого своеобразного «показателя цвета» детали — в зависимости от угла падения лучей лежит в пределах ошибок измерения. В качестве примера на рис. 1 приведены указанные кривые для двух материковых участков (деталей №№ 1 и 100). Однако для некоторых деталей наблюдается аномальное изменение яркости в инфракрасной области спектра, которое отражается на ходе зависимости «показателя цвета» от угла падения.

Материковый участок около кратера Гримальди (деталь № 101) при $i > -40^\circ$ (т. е. при угле фазы $\Phi > +30^\circ$) постепенно «синее», так что «показатель цвета» увеличивается почти на 0.35 (рис. 2). Для сравнения на рис. 2 дана также кривая изменения Δ в зависимости от i для участка юго-восточного края Луны (деталь № 82).

Северо-восточный участок Моря Дождей (деталь № 68) при изменении i от $+30$ до $+60^\circ$ ($\Phi > +60^\circ$) уменьшает «показатель цвета» в инфракрасной области на 0.2 (рис. 3). Для северо-западного участка Моря Дождей (деталь № 56) на дополуночной части кривой при увеличении i от -60 до -30° «показатель цвета» уменьшается на 0.35. На послеполуночной части кривой при увеличении i от $+60$ до $+90^\circ$ Δ снова возрастает

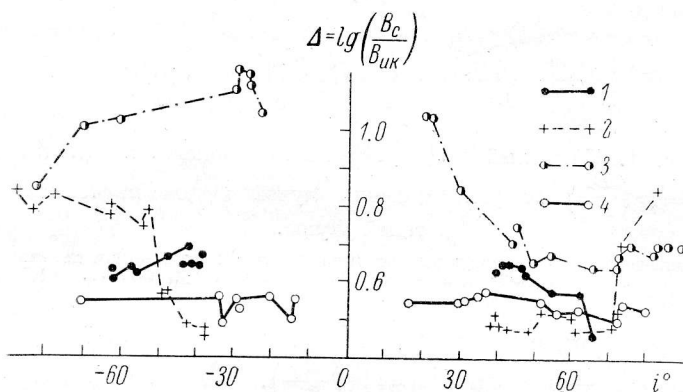


Рис. 3. Ход зависимости «показателя цвета» Δ от угла падения i .

1 — для северо-восточного участка Моря Дождей (деталь № 68, при $\epsilon=49^\circ 8$), 2 — для северо-западного участка Моря Дождей (деталь № 56, при $\epsilon=44^\circ 5$), 3 — для участка Моря Кризисов (деталь № 3, при $\epsilon=67^\circ 6$), 4 — для участка Моря Изобилия (деталь № 7, при $\epsilon=50^\circ 9$).

до первоначальной величины, т. е. этот участок моря становится более «красным» при изменении i от -60 до $+60^\circ$. Участки Моря Кризисов (детали №№ 3 и 6 — на рис. 3 показана кривая для одной из них — № 3) при $i = +30^\circ$ ($\Phi = -20^\circ$) начинают «краснеть», затем их «показатель цвета» резко уменьшается (на 0.45) и после $i = +50^\circ$ остается постоянным. В противоположность Моря Дождей и Моря Кризисов, например для участков Моря Нектара (деталь № 17) и Моря Изобилия (деталь № 7), не наблюдается такого хода в изменении Δ (на рис. 3 показана кривая для № 7).

Кратер Гримальди (деталь № 97) при $i > -30^\circ$ ($\Phi > +30^\circ$) и на послеполуночной части кривой при $i > 0^\circ$ становится «синее» («показатель цвета» его увеличивается на 0.3). У кратера Шиккард (деталь № 90) подобное «посинение» отсутствует (рис. 4).

Залив Радуги (деталь № 71) и горная область над ним (деталь № 72) при $i > +30^\circ$ ($\Phi > +65^\circ$) уменьшают свой «показатель цвета» (рис. 5). Для сравнения на рис. 5 приведена также кривая для горной области над восточной частью Океана Бурь (деталь № 98).

Интересно отметить, что для указанных деталей (за исключением северо-западного участка Моря Дождей) все эффекты «изменения окраски» начинают обнаруживаться при углах падения лучей, больших -30° , и особенно наглядно проявляются на послеполуночной части кривых. Возможно, что эти эффекты объясняются присутствием в названных участках каких-то неизвестных нам минералов. При восходе Солнца над

данными образованиями эти минералы ведут себя одинаково в синей и инфракрасной областях спектра. При постепенном нагреве у одних деталей яркость возрастает в инфракрасной области спектра по сравнению с синей (Залив Радуги и горная область над ним, Море Кризисов, северо-западный участок Моря Дождей), у других — наоборот, уменьшается (кратер

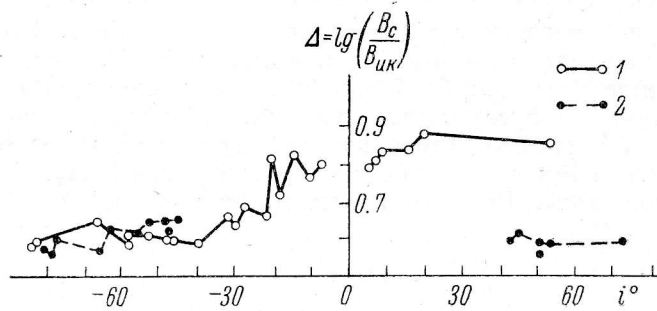


Рис. 4. Ход зависимости «показателя цвета» Δ от угла падения i .

1 — для кратера Гримальди (деталь № 97, при $\epsilon=64^{\circ}6$), 2 — для кратера Шиккард (деталь № 90, при $\epsilon=61^{\circ}3$).

Гримальди, материковый участок, лежащий рядом с ним, северо-восточный участок Моря Дождей). Может быть, здесь мы имеем дело с минералами, которые под действием нагревания меняют свой цвет. Правда, таких веществ на Земле мы пока не знаем, но это не исключает возможности их существования.

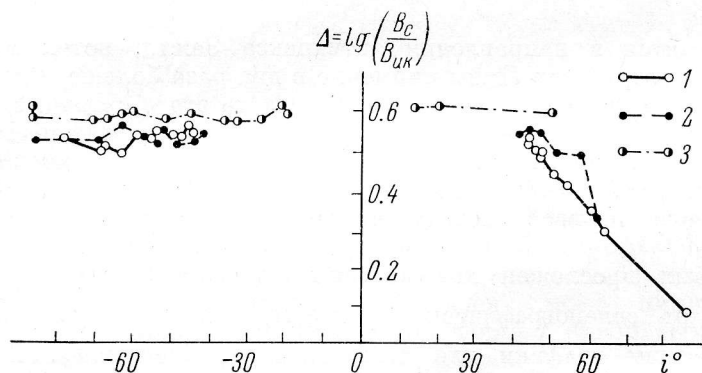


Рис. 5. Ход зависимости «показателя цвета» Δ от угла падения i .

1 — для залива Радуги (деталь № 71, при $\epsilon=60^{\circ}1$), 2 — для горной области над Заливом Радуги (деталь № 72, при $\epsilon=58^{\circ}6$), 3 — для горной области над восточной частью Океана Бурь (деталь № 98, при $\epsilon=68^{\circ}8$).

В ряде работ указывается на различие в поведении деталей западного и восточного краев Луны, что, по всей вероятности, связано с разной плотностью вещества наружного покрова участков западной и восточной краевых зон [2]. Возможно, именно этим объясняется anomalous изменение яркости кратера Гримальди и соседнего с ним материкового участка (на восточном крае Луны) и Моря Кризисов (на западном крае Луны). Большой интерес в связи с этим представляют результаты исследований М. Н. Маркова и В. Л. Хохловой [3], обнаруживших, что скорость нагре-

вания восточного края Луны после полной фазы меньше скорости нагревания западного края. Такое различие, как указывают авторы, может быть вызвано тем, что на восточном крае вследствие большей теплопроводности поверхностного слоя энергия поглощается быстрее, чем на западном крае. Тепловые аномалии и связанные с ними фотометрические особенности [4] могут обуславливаться также наличием в этих участках, наряду с пористым веществом, скальных образований. В формировании лунного микрорельефа значительную, а может быть, и основную роль играют внешние факторы: бомбардировка микрометеоритами и воздействие солнечных корпускулярных потоков. Интересны расчеты Дикуса и Бредфорда [5], относящиеся к влиянию гравитационного поля Земли на распределение метеорного вещества у поверхности Луны и в окололунном пространстве. По этим расчетам, близ первой четверти, когда

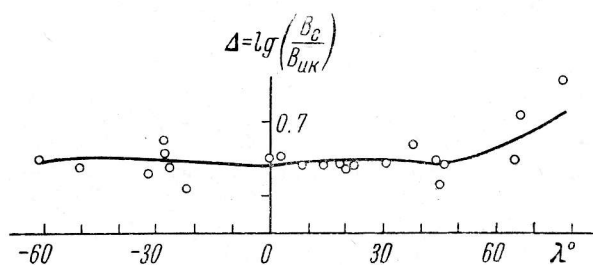


Рис. 6. Зависимость «показателя цвета» $\Delta = \lg\left(\frac{B_c}{B_{ик}}\right)$ от селенографической долготы λ для угла падения лучей $i = +10^\circ$.

Луна находится в направлении антиапекса Земли, поток метеорного вещества у поверхности Луны примерно в два раза больше, чем в момент наступления последней четверти. В результате этого суточные вариации и интенсивность потока метеорного вещества на западном крае Луны будет больше по сравнению с восточным краем. Вполне вероятно, что это обстоятельство является одной из причин появления различий в структурных и фотометрических особенностях деталей западной и восточной краевых зон Луны.

Нами был прослежен ход зависимости «показателя цвета» $\Delta = \lg\left(\frac{B_c}{B_{ик}}\right)$ от селенографической долготы, для чего были построены соответствующие графики для различных углов падения. В качестве примера на рис. 6 приведен график для угла падения $i = +10^\circ$. Из этого и других аналогичных графиков для остальных углов падения можно видеть, что ход зависимости $\Delta(\lambda)$ меняется при изменении условий освещения. Реальными различиями цвета можно считать только отклонение величины $\Delta(\lambda)$ для отдельных деталей от среднего значения $\overline{\Delta(\lambda)}$, т. е. $\Delta'(\lambda) = \Delta(\lambda) - \overline{\Delta(\lambda)}$. Усреднение значений $\Delta(\lambda)$ проводилось нами по методу наименьших квадратов [6].

Ход зависимости «показателя цвета» Δ от селенографической долготы λ деталей связан с различием фазовых кривых Луны [1] в синей и инфракрасной областях спектра. Это различие вполне объясняется возрастанием альbedo Луны в инфракрасной области и, следовательно, увеличением роли вторичного рассеяния в этой области.

Интересно провести сравнение полученных нами «показателей цвета» со стандартной системой показателей цвета $UBVRI$. Для перехода к звездным величинам мы использовали внефокальные снимки звезд, сделанные

нами одновременно со снимками Луны и на таких же зенитных расстояниях. Мы получили значения «показателей цвета» ($m_{920 \text{ мкм}} - m_{430 \text{ мкм}}$) для исследованных деталей. Среднее значение его равно 0.83. Этому «показателю цвета» примерно соответствует цветовая разность ($I-B$), равная для средней Луны 0.81 (вычислена по работе Д. Л. Гарриса [7]). Небольшое различие значений «показателей цвета», вероятно, связано с несопадением исследуемых нами длин волн с длинами волн в стандартной системе.

В работе [4] нами получены экспериментальные кривые распределения яркости по поверхности Луны для 101 детали. Для выявления фотометрических особенностей деталей лунной поверхности мы воспользовались развитой Б. Хапке теорией отражения света от пористых субстанций и полученной им формулой [8]:

$$B(\Phi, \lambda, q) = A_0 \varphi(\Phi, \lambda) \psi(\Phi) b(\Phi, q),$$

где Φ — угол фазы; λ — селенографическая долгота изученной детали Луны; q — фактор упаковки — параметр, связанный с относительной плотностью соотношением $q = 2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2/3}$, для фотометрически средней лунной поверхности $q \approx 0.6$; A_0 — нормировочный множитель;

$$\varphi(\Phi, \lambda) = \frac{1}{1 + \frac{\cos \lambda}{\cos(\lambda - \Phi)}};$$

$$\psi(\Phi) = \frac{\sin |\Phi| + (\pi - |\Phi|) \cos \Phi}{\pi};$$

$$b(\Phi, q) = \begin{cases} 2 - \frac{\text{tg} |\Phi|}{2q} \left(1 - e^{-\frac{q}{\text{tg} |\Phi|}} \right) \left(3 - e^{-\frac{q}{\text{tg} |\Phi|}} \right) & \text{при } |\Phi| < \frac{\pi}{2}, \\ 1 & \text{при } |\Phi| \geq \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

Сравнение наших экспериментальных кривых распределения яркости по отдельным деталям в зависимости от угла фазы с теоретическими кривыми, построенными на основании формулы Б. Хапке (значения функции Хапке взяты из работы Н. П. Барабашова и В. И. Езерского [9]), показывает, что их соответствие имеет место для большого интервала углов фазы Φ и селенографических долгот λ . Расхождения между ними становятся существенными только для больших значений λ при малых углах падения солнечных лучей, что, возможно, связано с люминесценцией Луны.

По внефокальным снимкам звезд нами вычислены значения яркостного фактора (альbedo) для отдельных деталей Луны в инфракрасной области спектра. Среднее альbedo для всех изученных деталей по нашим определениям $A_{\text{нк}} = 0.20 \pm 0.04$. По определению альbedo в спектральной области 1 мк при полете Стратоскопа II [10] получено значение $A_{\text{нк}} = 0.18$. В системе $UBVRI$ принимается $A_I = 0.17$. Определенная нами величина (как и результат Н. Н. Евсюкова [11]) находится в хорошем согласии с этими значениями.

Обнаружение цветовых различий на Луне проводилось до сих пор путем фотометрирования снимков Луны, полученных в разных участках спектра. Такой же методике следовали и мы, фотометрируя выбранные детали по инфракрасным и «синим» снимкам Луны. Такой способ позволяет обнаружить только некоторые цветовые различия, но не дает возможности определить структуру и очертание участков, имеющих эти

различия. Нами сделана попытка применить метод наложения негатива, полученного в одном участке спектра, на позитив, полученный в другом участке спектра [12]. При совмещении негатива на пластинке, чувствительной к синей области спектра, и позитивной копии с негатива, полученного на пластинке, чувствительной к инфракрасной области, более темный тон должен соответствовать большей насыщенности красного цвета. Трудность этого метода состоит в сложности совмещения негатива и позитива. Мы для этой цели пользовались увеличителем. На совмещен-

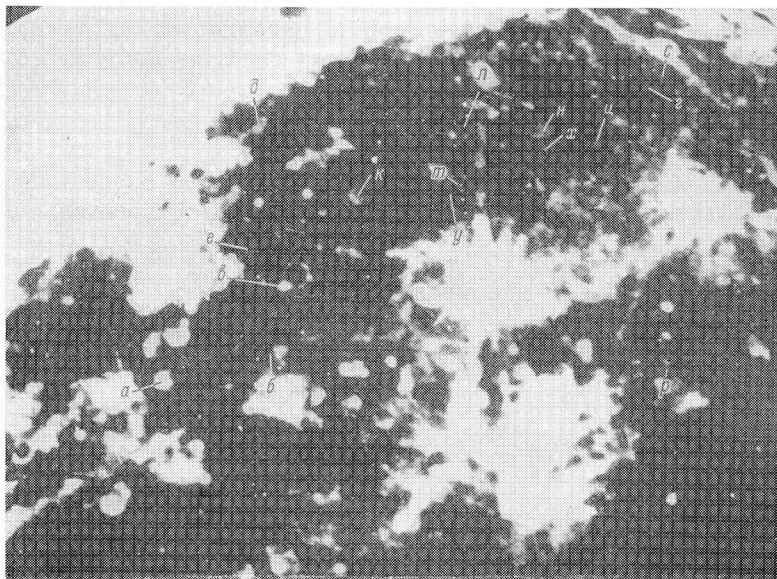


Рис. 7. «Синий» контрастный отпечаток Луны.

ном снимке Луны, полученном таким образом, видно, что Море Дождей имеет пятнистую структуру. Белым пятном на совмещенном снимке получается кратер Аристарх, что еще раз (см. [1]) свидетельствует о его голубой окраске. Голубоват вал кратера Коперник, хотя его лучи имеют ярко выраженный красный цвет.

Кроме того, мы попытались использовать для обнаружения цветовых различий метод контрастной перепечатки. Со снимков, сделанных на пленке И-920 ($\lambda_{эфф} = 920$ ммк) и на диапозитивных пластинках Agfa ($\lambda_{эфф} = 430$ ммк), получали позитивы (на пластинках FU-5), с них — контрастные негативы, а с последних — позитивные отпечатки (на фотобумаге №№ 5—7). По полученным отпечаткам можно проводить только относительное сравнение — по отношению к какой-либо точке. В качестве примера на рис. 7 приведен «синий», а на рис. 8 — инфракрасный отпечатки со снимков Луны, полученных на пятый день после полнолуния. Контраст снимков подбирался таким образом, чтобы на них одинаково пропечатывались детали *а* и *в*. В синих лучах очень хорошо видны кольцевые структуры, либо отсутствующие на инфракрасных снимках (это образования *д*, *е*, *о*, *р*, *с*, *т*, *у*, *х*, *ц*, *ч*), либо едва намечающиеся на них (*б*, *к*, *л*). На снимках в области $\lambda_{эфф} = 430$ ммк кратер Марий (*н* на рис. 7) довольно яркий и окрестности его покрыты голубым веществом, на инфракрасных снимках этот кратер еле намечается. На «синих» снимках очень хорошо видны лучистые образования, некоторые компоненты которых либо отсутствуют,

либо только намечаются на инфракрасных снимках. По-видимому, в лучистых образованиях преобладает голубоватое вещество.

Мы сравнили эти снимки с лунными атласами [13, 14] и с геологическими картами Луны [15]. Отмеченные выше кольцевые структуры отсутствуют в атласах. Лучистым образованиям соответствуют участки

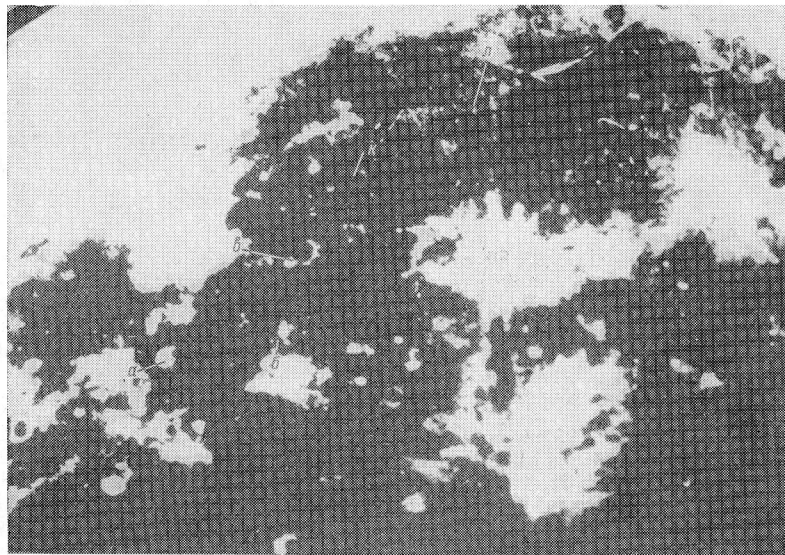


Рис. 8. Инфракрасный контрастный отпечаток Луны.

голубого цвета на геологических картах. Вполне возможно, что в инфракрасных лучах лучше проявляется макрорельеф, а в синих — наносный слой. Все это пока чисто качественные результаты.

Литература

1. М. Н. Наугольная, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 2, 94, 1970.
2. Н. П. Барабашов и др., Астр. ж., 43, 1039, 1966.
3. М. Н. Марков, В. Л. Хохлова, Астр. ж., 42, 386, 1965.
4. T. Gold, Harvard Repr., No. 148, 261, 1959.
5. R. D. Ducas, D. C. Bradford, Icarus, 3, No. 4, 306, 1964.
6. Б. М. Шиголов. Математическая обработка наблюдений, ч. 4. «Наука», М., 1969.
7. Д. Л. Гаррис, Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников. В кн.: «Планеты и спутники», ИЛ, М., 1963, гл. 8.
8. В. Нарке, J. Geophys. Res., 68, No. 15, 4571, 1963.
9. Н. П. Барабашов, В. И. Езерский, Вестн. Харьк. гос. ун-та, № 4, вып. 1, 22, 1965.
10. R. V. Wattson and R. E. Danielson, Astrophys. J., 142, 16, 1965.
11. Н. Н. Евсюков. Абсолютная фотометрия Луны в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра. Автореф. канд. дисс. Харьков, 1967.
12. Фигуры Луны и проблемы лунной топографии. Сб. статей. Перев. с англ. и нем. под ред. Ю. Н. Липского. «Наука», М., 1968.
13. E. A. Whitaker, G. P. Kuiper et al., Rectified Lunar Atlas. Tucson, Univ. of Arizona Press, 1963.
14. G. P. Kuiper. Photographic Lunar Atlas based on photographs taken at the Mount Wilson. Univ. of Chicago Press, 1960.
15. J. H. Moore. Geologic Map of the Seleucus Quadrangle of the Moon. Published by the U. S. Geological Survey, Washington D. C., 1962—1969.

Декабрь 1969 г.