

- Левин Б. Ю., О размерах астероидов, Астрон. цирк. № 141, 3—4, 1953.
- Рийвес В. Г., Коэффициент фазы как показатель степени изрытости поверхности астероидов, Публ. астрон. обсерв. Тарту 32, № 2, 129—136, 1952.
- Шаронов В. В., О характеристиках отражательной способности небесных тел, Астрон. журн. 11, 473—483, 1934.
- Шаронов В. В., Иллюстративное альbedo как выражение отражательной способности тел солнечной системы, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 31, 6—7, 1953.
- Beil L., The physical interpretation of albedo, Astrophys. Journ, 45, 1—29, 1917.
- Rougier G., L'albedo des planetes et de leurs satellites, L'Astronomie 51, 165—184, 1937.
- Russell H., On the albedo of the planets and their satellites, Astrophys. Journ. 43, 173—196, 1916.
- Stumpff K., Über die Albedo der Planeten und die photometrische Bestimmung von Planetoidendurchmessern, Astron. Nachr. 276, 3, 118—126, 1948.

ГЛАВА VII

ФОТОМЕТРИЯ ПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

§ 39. Задачи и проблемы поверхностной фотометрии тел солнечной системы

В отличие от интегральной фотометрии, изучающей лучистый поток, отражаемый целым полушарием планеты, поверхностная фотометрия исследует интенсивность света, рассеиваемого отдельными, по возможности небольшими участками поверхности тела. Это дает возможность получать исходный материал для суждений о природе вещества, образующего видимую поверхность наблюдаемого объекта в данном месте. Благодаря этому для исследования природы планет и спутников поверхностная фотометрия представляет значительно большую ценность, чем измерения интегрального блеска. Однако и техника ее выполнения значительно труднее.

Во-первых, необходимость исследовать очень малые по угловым размерам участки диска требует получения изображения светила в достаточно большом масштабе. Это заставляет прибегать к телескопам с очень большим фокусным расстоянием. Наличие фокус объектива, как правило, оказывается недостаточным, и потому приходится пользоваться дополнительными увеличивающими системами, что отрицательно сказывается на качестве изображения.

Во-вторых, необходимым условием успеха измерений является спокойствие изучаемого изображения, что предъявляет исключительные требования к состоянию атмосферы в месте наблюдения. В результате оказывается, что для поверхностной фотометрии малых объектов по-настоящему пригодны лишь немногие пункты, да и в них работа может быть успешной лишь в некоторые ночи с наилучшими изображениями.

В-третьих, результат измерения яркости искажается целым рядом погрешностей систематического характера, изучение и устранение которых далеко не просты. Сюда прежде всего относится дифракция, которая была подробно рассмотрена в гл. II и которая

искажает распределение яркости по полученному в фокусе телескопической системы изображению диска. Специальные исследования этого вопроса с точки зрения фотометрии были выполнены В. Г. Фесенковым, Нагоака и другими. В случае фотографического метода наблюдения сюда присоединяются весьма тягостные эффекты фотографической иррадиации, исследованные И. А. Паршиным, В. В. Шароновым и другими и описанные в § 11.

Большую опасность представляет также всякого рода посторонний свет, накладывающийся на изучаемое изображение планетного диска. Его источником может быть рассеянный свет земной атмосферы, интенсивный при сильном развитии атмосферного ореола, что было исследовано в трудах В. Г. Фесенкова, И. И. Пархоменко, Н. М. Штауде, а также всякого рода блики и отражения в оптической системе телескопа и фотометра.

Четвертый источник затруднений создается тем, что одного измерения яркости бывает недостаточно, поскольку требуется точная фиксация фотометрируемого участка на диске планеты, и потому наблюдение должно сопровождаться измерением координат. Трудности последнего были подробно выяснены в § 18; легко понять, что в сочетании с фотометрическим измерением эти трудности значительно возрастают. В результате нередко бывает, что хорошие фотометрические измерения обесцениваются неудовлетворительным определением положений измеряемых участков.

Непосредственным результатом измерений в поверхностной фотометрии является яркость в соответствующей точке диска. В простейшем случае ее выражают в произвольных единицах, например, принимая за единицу яркость центра диска светила. Так поставленная фотометрия называется *относительной*. Она ограничивается фотометрическим сравнением между собой различных мест на поверхности светила и дает только распределение яркости по диску объекта (например, кривую, выражающую потемнение к краю диска).

Техника относительной фотометрии существенно упрощается тем, что благодаря малым размерам диска можно совсем не учитывать ослабление света в земной атмосфере, считая, что оно одинаково для всех сравниваемых точек. Планетная фотометрия, по сравнению с поверхностной фотометрией других светил, облегчается еще тем, что яркость планетных дисков по своему абсолютному значению лежит в пределах наиболее удобного для наблюдений интервала, и потому тут не возникает ни помех от чрезмерной интенсивности излучения, сопровождающих наблюдение деталей солнечной поверхности, ни затруднений, связанных с недостатком света, характерных для фотометрии туманностей, комет и Млечного Пути. Кроме того, градация яркостей в пределах

освещенного диска планеты чаще всего бывает небольшой, так что не возникает трудной для фотометрии задачи перекрытия больших различий яркости.

Более совершенной формой фотометрии протяженных небесных объектов является фотометрия *абсолютная*, которая ставит своей задачей получать значение яркости изучаемых объектов в абсолютных единицах. В общей визуальной фотометрии за такую единицу принимается 1 *стильб*, соответствующий такому испусканию света, при котором каждый квадратный сантиметр площади светящейся поверхности имеет силу света в одну свечу. В астрономии аналогичной единицей служит *звездная величина на квадратную секунду дуги*, применяемая как к визуальной, так и к фотографической системам величин. Единицей в этом случае служит яркость такого места небесной сферы, участок которого, охватываемый телесным углом в одну квадратную секунду дуги, обладает блеском, соответствующим звезде нулевой звездной величины. Впрочем, применение указанных единиц яркости к случаю планет и спутников большого интереса не представляет, поскольку яркость этих несамосветящихся объектов определяется прежде всего интенсивностью солнечного освещения. Зато огромный интерес представляет получение разного рода характеристик отражательной способности, как, например, коэффициента яркости, светлоты, плоского и видимого альбеда. Измерение таких характеристик и составляет главную задачу поверхностной фотометрии тел солнечной системы.

Всякого рода измерения, относящиеся к области абсолютной фотометрии протяженных небесных объектов, обязательно включают в себя сравнение яркости изучаемого объекта с яркостью стандартных или образцовых объектов, для которых известно либо абсолютное значение яркости, либо значение одной из величин, характеризующих отражательную способность. Такое сравнение составляет операцию, называемую *стандартизацией*. Выполнение стандартизации и отличает абсолютную фотометрию от относительной.

В качестве эталонных объектов в зависимости от принятого метода стандартизации могут быть использованы: искусственные источники света, внефокальные изображения звезд, солнечный диск и, наконец, различного рода экраны, освещаемые солнечными лучами. Большие затруднения тут создаются необходимостью строго учитывать атмосферное ослабление. В частности, при сравнениях с солнечным светом это приходится проделывать дважды: при наблюдении планеты ночью и при измерениях солнечного света днем. Это ставит успех работы в зависимости от атмосферных условий и потому заставляет выбирать для наблюдений пункты с устойчивым состоянием прозрачности воздуха. Подробности по этому поводу будут изложены в § 41.

§ 40. Техника поверхностной фотометрии

Сравнение яркостей различных точек диска светила между собой и с яркостью фотометрического стандарта может осуществляться в разных участках спектра, в частности в тех, которые определяют общепринятые в астрономии фотометрические системы: нормальную фотографическую, фотовизуальную, визуальную, фотокрасную. Технически оно может выполняться фотометрическими приборами различного устройства: визуальными, фотогра-

фическими и фотоэлектрическими. Применение радиометрии позволяет вести наблюдение в далеких инфракрасных частях спектра, а методы спектрофотометрии позволяют получать данные для монохроматической радиации. Наконец, сочетание фотометрической установки с поляризационными приспособлениями позволяет находить величину поляризации и положение плоскости последней.

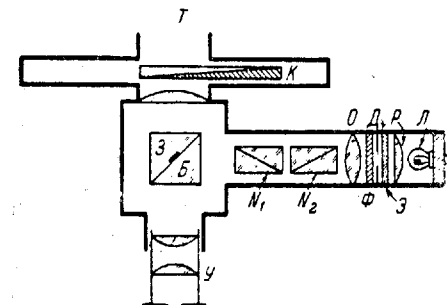


Рис. 70. Схема визуального поверхностного фотометра.

Для измерения яркости визуальным путем применяется поверхностный астрофотометр, навинчиваемый на окулярный конец телескопа и составляющий вместе с последним длиннофокусный телефотометр. Общая схема такого прибора изображена на рис. 70.

В фокусе окуляра $У$ располагается фотометрический кубик $Б$. В его центральной части устроено небольшое поле сравнения $З$ в виде зеркальца, т. е. посеребренного участка гипотенузной плоскости одной из двух прямоугольных призм, составляющих кубик. Поскольку призмы склеены канадским бальзамом, вне отражателя $З$ лучи проходят сквозь куб свободно, и наблюдатель видит в поле зрения изображение наблюдаемого объекта, образуемое объективом телескопа $Т$, к которому привинчен фотометр, и на фоне этого изображения—поле сравнения $З$, освещенное светом лампы сравнения $Л$. Лучи последней при помощи конденсора $Р$ равномерно освещают рассеивающий экран $Э$ (обычно—матовое стекло). Изображение участка последнего, ограниченного диафрагмой $Д$, с помощью объектива $О$ образуется в центре кубика.

Наблюдение состоит в получении фотометрического равновесия, т. е. такого положения, при котором яркости объекта и расположенного на его фоне поля сравнения $З$ представляются глазу наблюдателя одинаковыми. Для этого служит фотометрическая система прибора, которая располагается либо на пути лучей от объекта (на рис. 70 она изображена в виде фотометрического

клина $К$) и в этом случае в желаемой мере ослабляет яркость изображения светила, либо на пути лучей лампы (на рис. 70 представлена в виде двух поляризационных призм N_1 и N_2), и тогда она меняет яркость поля сравнения $З$. Диск Луны или планеты почти всегда оказывается ярче поля сравнения, освещенного слабым светом лампы, и потому его яркость приходится ослаблять.

На практике чаще всего устраивают ослабляющие приспособления на обоих путях. Так, в распространенном на наших обсерваториях фотометре Розенберга на пути лучей лампы помещена поляризационная система, составленная из трех поляризационных призм и серого клина, в то время как на стороне объекта помещаются нейтральные светофильтры разной плотности. В фотометре В. В. Шаронова на стороне объекта располагается фотометрический клин, а яркость поля сравнения варьируется изменением расстояния между лампой $Л$ и экраном $Э$. В фотометрах А. В. Маркова изменяется только яркость поля сравнения, что в одном из приборов достигается изменением отверстия диафрагмы, а в другом—поляризационной системой.

Успех измерения на визуальном фотометре зависит от ряда тонких деталей в устройстве прибора. Во-первых, необходимо полное устранение так называемого фотометрического параллакса. Это явление состоит в том, что относительная яркость сравниваемых изображений меняется вместе с перемещением глаза относительно окуляра и происходит от неточного совмещения выходных зрачков оптических систем, освещающих первое и второе поля фотометра. Во-вторых, необходимо отсутствие всякой линии раздела между этими полями, обеспечивающее при равенстве яркостей слияние изображения наблюдаемого объекта и освещенного лампой зеркальца в сплошную однородную поверхность. В таких условиях задача глаза вместо суждения о равенстве или неравенстве двух яркостей ограничивается констатированием видимости или невидимости поля сравнения на фоне наблюдаемого объекта. Однако полное слияние полей возможно только при совершенно одинаковом цвете. Поскольку свет лампы значительно краснее излучения планет, освещаемых солнечным светом, это влечет за собою необходимость вводить в фотометр добавочные приспособления для выравнивания цвета, например синий светофильтр $Ф$ (рис. 70), на пути лучей лампы. Так как цвет светила меняется с его зенитным расстоянием, постоянный светофильтр тоже не решает вопроса до конца, что заставляет применять колориметрическое приспособление, позволяющее плавно менять цвет в широких пределах и технически осуществляемое, например, в виде клина из синего стекла. Меняя цвет, такое устройство изменяет и яркость, что ставит вопрос об его точном фотометрическом исследовании.

Удовлетворить перечисленным выше требованиям на практике обычно не удается, что влечет за собой снижение точности измерений. Этим и объясняется то, что та высокая точность визуальной фотометрии, какая получается при лабораторных измерениях и которая характеризуется средней квадратичной погрешностью единичного измерения порядка $\pm 0,01-0^m,005$, при наблюдении небесных объектов обычно не достигается. Практика измерений Луны и планет показывает, что реальная точность одного отсчета тут редко бывает выше $\pm 0,02-0^m,05$.

Сравнение яркости фотографическим путем выполняется общеизвестным способом, который состоит в том, что при помощи астрографа с достаточно длинным фокусом получают негатив изучаемого светила, на который наносится также фотометрическая шкала. Процесс получения последней называется *фотометрической калибровкой* негатива. Изображения объекта и шкалы измеряются на микрофотометре. Отношение яркостей сравниваемых объектов получается через характеристическую кривую, которая строится по данным измерения калибровочной шкалы. При этом по оси абсцисс откладываются логарифмы яркости, а по оси ординат—соответствующие им на негативе оптические плотности. Поскольку абсолютное значение последних интереса не представляет, для упрощения техники дела по оси абсцисс часто откладывают прямо отсчеты шкалы микрофотометра или их логарифмы.

Для получения шкалы чаще всего применяется отпечаток фотометрического клина или ступенчатого нейтрального ослабителя (так называемый «абшвехер»), а также трубчатый (трубчатый) фотометр. Клин имеет то преимущество, что получаемая с ним засветка дает непрерывный ход плотностей; его недостатком является селективное поглощение света. Кроме того, сам клин должен быть предварительно проградуирован при помощи какого-нибудь абсолютного фотометрического приспособления. Трубчатый фотометр считается абсолютным прибором, что надо понимать в том смысле, что он не требует фотометрической градуировки; кроме того, он является вполне нейтральным, т. е. его шкала одинакова для всех участков спектра. Зато эта шкала дискретна.

Проведение характеристической кривой по отдельным точкам обычно бывает связано с известным произволом и сопровождается заметными погрешностями. Поэтому заслуживает внимания *метод автокалибровки*, предложенный А. В. Марковым и позволяющий обходиться совсем без характеристической кривой. Он состоит в том, что часть негатива с отпечатком клина отрезается и вставляется в микрофотометр таким образом, чтобы осуществлялось прямое сравнение оптической плотности изображения с плотностью градационной шкалы.

Чтобы результаты были вполне надежны, получение экспозиций объекта, шкалы и стандартизационных изображений должно

подчиняться ряду правил, важнейшими из которых являются нижеследующие:

1. Строгое равенство продолжительности выдержек для всех сопоставляемых засветок.

2. Отсутствие значительного интервала во времени между экспозициями (иногда возникает так называемый *кумулятивный эффект*) и одинаковое состояние эмульсионного слоя (температура, влажность) при всех экспозициях.

3. Устранение всяких источников посторонних засветок (рассеянный свет, блики) и вуали до, во время и после съемки.

4. Одинаковый спектральный состав излучения у всех сравниваемых изображений. В частности, необходимо, чтобы искусственный источник света, используемый для получения градационной шкалы, был подогнан под спектральную кривую солнечного света.

5. Получение всех сравниваемых изображений на одной пластинке и строго однородное проявление последней. Если сфотографировать все, что надо, на одном негативе невозможно (что часто бывает при использовании сложных способов стандартизации), то необходимо, чтобы сопоставляемые негативы были связаны фотометрически через стандартно получаемую на них градационную шкалу или через специально осуществляемую стандартную засветку, называемую «маркой».

Измерение негатива на микрофотометре также должно быть обставлено рядом предосторожностей, обеспечивающих устранение различных источников погрешностей. обстоятельный разбор этого вопроса дан в работах А. В. Маркова.

В области фотометрии поверхностных объектов (в отличие от звездной фотометрии) часто предпочитают визуальные микрофотометры, мотивируя это тем, что у них случайная погрешность отсчета мало меняется с плотностью измеряемого изображения, в то время как на объективных приборах ее относительная погрешность растет обратно пропорционально отбросу гальванометра. Наиболее широко распространенный микрофотометр системы Гартмана прост и удобен в обращении, но в обычном оформлении не дает возможности фиксировать координаты с необходимой точностью. Поэтому Н. Н. Сытинской специально для фотометрии планет и солнечной короны была разработана, а мастерской Астрономической обсерватории Ленинградского университета построена усовершенствованная модель такого прибора, столлик которой представляет собою прецизионную измерительную машину, позволяющую измерять прямоугольные координаты с точностью до 1μ ; при желании можно измерять и полярные координаты.

К числу невыгодных сторон микрофотометра Гартмана относится то, что при измерении небольших объектов приходится

пользоваться кубом с очень маленьким внутренним полем сравнения, что снижает точность наведений; кроме того, некоторые затруднения создаются зернистостью эмульсионного слоя. От указанных недостатков свободен визуальный микрофотометр системы А. В. Маркова, устроенный на принципе яркости зрачка. Однако отсутствие столика с точным отсчетом координат ограничивает возможности применения этого прибора для фотометрии планетных дисков.

Фотоэлектрические и термоэлектрические микрофотометры с успехом могут быть использованы для промеров снимков не слишком высокой плотности. К сожалению, конструкция столика такого прибора обычно бывает приспособлена для точного отсчета только одной координаты, поскольку для измерения спектрограмм этого достаточно. Приборы с автоматической регистрацией очень удобны для исследования распределения яркости вдоль радиуса диска и выявления малоcontrastных объектов.

При интерпретации результатов фотографической фотометрии всегда следует помнить, что никакая тщательность в работе не может устранить многих важных источников погрешностей, присущих фотографическому процессу. Так, зернистое строение проявленного фотографического слоя кладет естественный предел возможностям измерения малых изображений, определяемый тем, чтобы колебания плотности, вызываемые случайным расположением зерен, были нечувствительны. Зубчатый характер регистрограмм, получаемых при промере на саморегистрирующем микрофотометре изображений однородных по своей природе объектов, может служить наглядной иллюстрацией таких колебаний. Из других источников погрешностей важнейшее значение имеют: *фотографическая иррадиация*, результатом которой является кажущееся распространение яркости за действительные пределы изображения, и *эффект Эбергарда*, вносящий искажения на границе двух изображений различной плотности (см. § 11).

Внутренняя точность фотографической фотометрии, как известно, определяется случайной погрешностью в $0,05—0^m,10$, которая зависит главным образом от неоднородности эмульсионного слоя. Многочисленные систематические эффекты снижают еще более реальную точность. Результатом являются значительные разногласия в выводах у разных авторов при решении таких вопросов, как величина потемнения у края дисков Юпитера и Сатурна.

Фотоэлектрическое измерение яркости на планетных дисках при помощи существующих сейчас звездных фотометров основано на том, что в фокальной плоскости телескопа располагается диафрагма с небольшим отверстием, которое и ограничивает измеряемый участок изображения диска. Лучистый поток, прошедший через эту диафрагму и измеряемый фотоэлементом, будет пропорционален освещенности в фокальной плоскости, а следовательно,

и яркости измеряемого участка. Следует ожидать, что при надлежащем применении такого метода случайная погрешность измерения может быть доведена до $\pm 0,005—0^m,001$. Однако систематические погрешности разного рода и здесь будут не меньше, чем при визуальной и фотографической фотометрии. Кроме того, как и в случае визуального метода, остается неясным вопрос определения координат.

В настоящее время мы имеем только одиночные попытки применения фотоэлектрических методов к измерению яркости планетных дисков. В будущем необходимо создать специальные конструкции объективных фотометров для протяженных объектов. Первый проект такого прибора был предложен А. В. Марковым.

Сопоставление трех методов фотометрирования планетных дисков: визуального, фотографического и фотоэлектрического, позволяет сделать следующие выводы. Визуальный метод дает достаточную точность, на нем мало сказывается эффект дрожания изображений, удобен контроль за наблюдаемым участком. Крупным недостатком является невозможность фиксировать координаты наблюдаемого объекта, что заставляет наблюдателей оценивать положение на глаз по конфигурации пятен и очертаниям диска.

Фотографический метод измерения очень удобен тем, что фиксация координат в нем выполняется легко и точно, поскольку многие конструкции микрофотометров имеют столик для крепления негатива, снабженный точными микрометрическими винтами. Точность самого фотометрирования ниже, чем при других методах. Дрожание изображений является очень опасным источником систематических погрешностей, так как ведет к размазыванию объекта и связанному с ним перераспределению яркости.

Высокая внутренняя точность фотоэлектрического метода обеспечивает ему будущее. Однако здесь предстоит еще очень большая работа, в частности в направлении создания удобных и точных методов фиксации координат. Дрожание изображений тут тоже создает серьезный источник различных погрешностей.

§ 41. Методы стандартизации; получение светлоты и яркостного фактора

Определение светлоты τ и яркостного фактора A_v основано на прямом или косвенном сравнении яркости данной точки диска светила с солнечным светом. Как было указано выше, процесс такого сравнения принято называть *стандартизацией измерений*, а измерения и наблюдения, включающие стандартизацию, — *абсолютными*. Техника стандартизации по солнечному свету разрабатывалась не только для фотометрического исследования планет и спутников, но и в связи с фотометрическими наблюдениями

солнечной короны, вследствие чего много существенных и полезных подробностей по этому поводу можно найти в отчетах и трудах экспедиций по наблюдениям полных солнечных затмений. Необходимо отметить, что эта отрасль фотометрических наблюдений разрабатывалась в основном в СССР, причем большая часть работ была выполнена фотометрической лабораторией Астрономической обсерватории Ленинградского университета.

Многочисленные варианты методов и приемов, применяемых для сравнений измерений яркости диска некоторого светила с солнечным светом, в общем могут быть сведены к пяти принципам стандартизации, различающимся не только техникой наблюдательной процедуры, но и присущей каждому принципу фундаментальной постоянной величиной, через которую производится определение отражательной способности небесного тела. Детальное изучение всех относящихся сюда вопросов дано в монографии Н. Н. Сытинской, посвященной методике абсолютной поверхностной фотометрии. Поэтому здесь достаточно бегло затронуть принципиальную особенность каждого из путей стандартизации. Поскольку светлота r связана с яркостным фактором A_v простым геометрическим соотношением (69) § 36, мы можем ограничиться вопросами определения A_v .

1. Сравнение яркости небесного объекта с яркостью лабораторного стандарта. Задача наблюдений, предназначенных для использования по этому методу, состоит в сравнении яркости b элемента диска светила с яркостью b_a эталонного прибора, для которой известно ее абсолютное значение B_a , выраженное в стильбах. Это позволяет найти выраженную в тех же единицах яркость небесного объекта:

$$B = \tau B_a \frac{b}{b_a}, \quad (1)$$

где τ — коэффициент пропускания синего светофильтра, о назначении которого будет сказано ниже.

Техника наблюдений состоит в том, что используют телескоп с привинченным на окулярном конце визуальным поверхностным астрофотометром. Телескоп наводят сначала на планету, для которой измеряют яркость b (в произвольных единицах), после чего его направляют на эталон яркости и определяют b_a . Рабочий эталон яркости должен быть установлен на достаточно большом расстоянии от башни телескопа (примерно равном стократному фокусному расстоянию), чтобы можно было вести наблюдения, не меняя фокусировки. При длиннофокусном инструменте это нередко оказывается затруднительным, а кроме того, невыгодно тем, что при большом удалении эталона приходится принимать в расчет ослабление лучей в приземном слое воздуха по пути от эталона до объектива. Поэтому иногда оказывается удобнее

поместить эталон ближе и соответственно изменить фокусировку окулярной части или перевинтить фотометр на телескоп с меньшим фокусным расстоянием, или же, наконец, вести стандартизацию совсем без объектива, приставляя отвинченный от телескопа фотометр непосредственно к эталону и перекрывая его площадью входной зрачок оставшейся оптической системы. Во всех перечисленных случаях в измерения приходится вводить поправочные множители, выражающие изменения в аппаратуре, определение которых не всегда просто.

Рабочий эталон яркости, как правило, представляет собою рассеивающий свет экран, освещенный стандартной лампой накаливания, работающей при строго постоянном режиме. В работах, основанных на применении такого метода, можно найти описание различных вариантов приборчиков, в которых это осуществляется достаточно удобно. Возможно применение в качестве стандарта яркости люминесцентной лампы, хотя опытов в этом направлении пока нет. Применение радиоактивных фосфоресцирующих экранов в качестве эталонов яркости для планетной фотометрии неудобно из-за низкой интенсивности и зеленой окраски свечения.

Наши метрологические учреждения, и в частности Всесоюзный институт метрологии, поверку рабочих эталонов яркости не производят, а потому это должен выполнять сам наблюдатель, используя образцовые лампы с известной силой света. Определение яркости B_a эталонного прибора сводится к тому, что перед светящейся поверхностью последнего помещают прецизионную диафрагму с точно известной площадью S и силу света I части поверхности эталона, ограниченной этой диафрагмой, измеряют путем сравнения с образцовыми лампами. Последнее рекомендуется выполнять на прецизионной фотометрической скамье, снабженной светомерной головкой нормального типа и при обязательном строгом соблюдении всех правил и указаний, относящихся к делу измерения силы света вообще.

Зная силу света I , легко вычислить и яркость B_a , выраженную в стильбах:

$$B_a = \frac{I}{S}, \quad (2)$$

причем I предполагается выраженной в свечах, а S — в квадратных сантиметрах.

Фотометрическое сравнение небесного объекта с рабочим эталоном яркости наталкивается на большие затруднения, вызываемые различием в цвете. Окраска большей части планет и спутников приближается к цвету солнечных лучей и соответствует цветовой температуре 5000—6000°, в то время как цветовая температура платинового эталона составляет всего 2046°, а цветовая температура ламп накаливания, используемых в качестве рабочих эталонов

силы света, во всяком случае не превосходит 2800° . Вести визуальные фотометрические измерения при такой разнице в цвете, конечно, нельзя, а потому необходимо применять эталон в сочетании с синим фильтром «дневного света». Лучшие в смысле кривой спектральной прозрачности фильтры изготовляют из желатины, окрашенной анилиновыми красителями, выбранными по особым рецептам. Но такие светофильтры непрочны, а потому для обсерваторской работы удобнее пользоваться стеклянными фильтрами. Надлежащей толщины пластинки стекла различных номеров сорта СС часто оказываются вполне подходящими для данной задачи.

Разумеется, интегральный коэффициент пропускания τ для синего фильтра должен быть определен с большой точностью, что выполняется либо по методу последовательных ступеней, либо путем спектрального расчета. На технике такого определения, а также на выяснении тонких принципиальных различий между результатами, даваемыми двумя указанными методами, мы здесь не останавливаемся, отсылая интересующихся к специальным работам.

Имея абсолютное значение яркости B (в стильбах) участка поверхности планеты, мы можем вычислить нужную нам величину A_v по формуле

$$A_v = \frac{\pi B}{E_c p^M}, \quad (3)$$

где p — коэффициент прозрачности земной атмосферы, M — воздушная масса, а E_c — освещенность в фотах, создаваемая солнечными лучами на нормальной к ним плоскости, отстоящей от центра Солнца на расстоянии Δ , равном радиусу-вектору планеты в момент наблюдения. Эту величину рассчитываем согласно уже использованному нами равенству:

$$E_c = \frac{I_c}{\Delta^2} = \frac{E_{0c}}{\Delta^2}, \quad (4)$$

где I_c — сила света Солнца, выраженная в свечах, Δ_c — значение радиуса-вектора, выраженное в сантиметрах, Δ — то же значение, но выраженное в астрономических единицах, и, наконец, E_{0c} — так называемая световая солнечная постоянная, т. е. выраженная в фотах освещенность солнечными лучами на нормальной к ним плоскости, отстоящей от центра Солнца на 1 а. е.

Величина E_{0c} и является основной константой рассматриваемого метода стандартизации. Еще в 20-х годах текущего столетия в справочных изданиях и различного рода руководствах для нее можно было найти три различных значения: 6,1 фота (старая сводка Мюллера), 13,5 фота (Рессел) и 18,7 фота

(Дорно). Ввиду таких разногласий Астрономической обсерваторией Ленинградского университета в течение ряда лет велась работа по уточнению этого числа как путем переработки прежних материалов, так и путем накопления новых наблюдений. В настоящее время можно считать окончательно установленным, что правильным является число Рессела; вероятнейшее значение, полученное на основе имеющихся материалов, получается равным

$$E_{0c} = 13,5 \text{ фота},$$

чему соответствует сила света Солнца $I_c = 3,0 \cdot 10^{27}$ св и средняя яркость солнечного диска $2,0 \cdot 10^5$ сб.

Метод абсолютной яркости имеет ряд специфических для него неудобств и недостатков, к числу которых должны быть отнесены: 1) сложность необходимой аппаратуры, применение которой предполагает наличие хорошо оборудованной лаборатории и опытного вспомогательного персонала; 2) необходимость получать абсолютный коэффициент пропускания атмосферы p^M , т. е. фактически выполнять экстраполяцию измеренных значений b за атмосферу; 3) ненадежность основной константы E_{0c} ; 4) возможность применять метод только к визуальным измерениям, поскольку световые единицы в настоящее время установлены только для визуальной световой системы. Относительно последнего пункта необходимо заметить, что делались предложения распространить визуальную систему и на фотографические наблюдения, приняв для последних в качестве единицы яркость, визуально равную 1 сб при определенном спектральном составе. В качестве последнего указывался свет пламени свечи Гейфнера, ацетилен, прямых солнечных лучей (А. В. Марков), искусственно воспроизводимого солнечного света, естественного суммарного света (Н. Н. Сытинская). Однако все эти предложения пока не получили технической разработки в такой мере, которая позволяла бы их применять для интересующей нас здесь задачи.

Наряду с перечисленными недостатками метод абсолютной яркости имеет и преимущества, важнейшим из которых является возможность обойтись без стандартизационных наблюдений каких-либо небесных светил. Это избавляет наблюдателя от дневных наблюдений Солнца, обычно крайне трудоемких, и позволяет пользоваться методом и в тех случаях, когда наблюдения солнечного света почему-либо вообще неосуществимы.

II. Сравнение яркости небесного тела с яркостью рассеивающего экрана, освещенного прямым солнечным светом. Пусть экран расположен так, что его освещают только прямые лучи Солнца, находящегося на зенитном расстоянии z_c . Если лучи падают на экран нормально,

то яркость B_a экрана будет:

$$B_a = \frac{r_a}{\pi} \frac{E_{oc}}{\Delta_a^2} p_c^{M_c}, \quad (5)$$

где r_a — светлота экрана, E_{oc} — световая солнечная постоянная, Δ_a — радиус-вектор Земли в момент наблюдения экрана, p_c — коэффициент прозрачности атмосферы в тот же момент, а M_c — воздушная масса для зенитного расстояния z_c .

Посредством телефотометра или фотографическим путем определяется отношение b/b_a яркостей объекта b и экрана b_a , выраженных в произвольных единицах шкалы фотометра.

Абсолютная яркость B может быть выражена равенством

$$B = \frac{A_b}{\pi} \frac{E_{oc}}{\Delta_b^2} p_{п}^{M_{п}}, \quad (6)$$

где A_b — яркостный фактор, Δ_b — радиус-вектор планеты в момент ее наблюдения, а $p_{п}$ и $M_{п}$ — коэффициент прозрачности атмосферы и воздушная масса, соответствующие этому моменту.

Разделив равенство (6) на (5), получаем:

$$\frac{B}{B_a} = \frac{b}{b_a} = \frac{A_b}{r_a} \frac{\Delta_a^2}{\Delta_b^2} \frac{p_{п}^{M_{п}}}{p_c^{M_c}}, \quad (7)$$

откуда

$$A_b = r_a \frac{b}{b_a} \frac{\Delta_b^2}{\Delta_a^2} \frac{p_c^{M_c}}{p_{п}^{M_{п}}}. \quad (8)$$

Основной постоянной в этом методе является светлота экрана r_a , о технике определения которой будет сказано в следующем параграфе.

При практическом применении метода рассеивающего экрана успех определяется устройством и расположением последнего. Необходимо, чтобы экран действительно был освещен только прямыми лучами Солнца и, следовательно, чтобы он был надежно защищен от рассеянного света неба и земных предметов. Это достигается применением защитной трубки, достаточно широкой, вычерненной внутри и снабженной надлежащим количеством диафрагм, устраняющих зеркальные рефлексы от черных стенок. Необходимо, чтобы солнечный диск был полностью виден из всех точек рабочей поверхности экрана и чтобы в то же время окружающая его часть неба, попадающая в поле зрения передней диафрагмы, была минимальной. Одновременно оба эти требования могут быть удовлетворены лишь при достаточно длинной трубке, порядка 10 — 20-кратного значения диаметра экрана.

Для расположения экрана предложены различные варианты. Удобно применять экран из просвечивающего материала, например из молочного стекла, и наблюдать такой экран на просвет. В этом случае можно поместить экран непосредственно перед объективом телескопа или фотографической камеры, в результате чего защитная трубка будет составлять прямое продолжение трубы телескопа, что облегчает ее применение. Недостатком такого расположения является дополнительное освещение экрана светом, отраженным от линз объектива, учет которого требует особых экспериментов. Кроме того, устройство защитной трубы, имеющей длину порядка фокусного расстояния объектива рефрактора, сравнительно простое при маленьких инструментах, в случае крупных телескопов с большим отверстием объектива или зеркала наталкивается на громадные затруднения чисто технического порядка. Это заставляет предпочитать схему стандартизации, при которой ортотропный отражающий экран располагается на сравнительно большом расстоянии от телескопа, так что наблюдается фокальное изображение этого экрана. Поскольку защита экрана от рассеянного света посредством труб или иных приспособлений оказывается невыполнимой, приходится для исключения рассеянного света измерять яркость экрана дважды: сначала при суммарном освещении прямыми лучами Солнца и рассеянным светом (что дает значение b_{ac}), а потом, затенив экран от прямых солнечных лучей посредством небольшого и достаточно удаленного щитка, — только при рассеянном освещении (значение b_{ap}). Нужная нам яркость b_a , определяемая одними прямыми лучами, получается как разность измеренных яркостей:

$$b_a = b_{ac} - b_{ap}. \quad (9)$$

На рис. 71 представлен стандартизационный снимок экрана, полученный на Ташкентской обсерватории, причем затенена половина экрана, так что яркости b_{ac} и b_{ap} получаются на одном негативе.

Многочисленные испытания на практике, проводившиеся как при наблюдениях Луны или планет, так и при поверхностной фотометрии солнечной короны, показали, что стандартизация по принципу рассеивающего экрана является весьма удобной и дает результаты удовлетворительной точности, если только достаточно надежно определена основная постоянная метода r_a .

III. Метод сравнения яркости с освещенностью. В работе участвуют два фотометра: во-первых, поверхностный телефотометр, установленный на телескопе и используемый для измерения яркости b_1 детали на планетном диске, выраженной в произвольных единицах шкалы этого фотометра,

и, во-вторых, иллиуминометр, т. е. фотометр, предназначенный для измерения прямой солнечной освещенности e_2 , которая выражается тоже в произвольных, но других единицах этого второго фотометра. Полученные значения яркости и освещенности выносятся за атмосферу, для чего необходимо независимое определение двух коэффициентов прозрачности атмосферы:

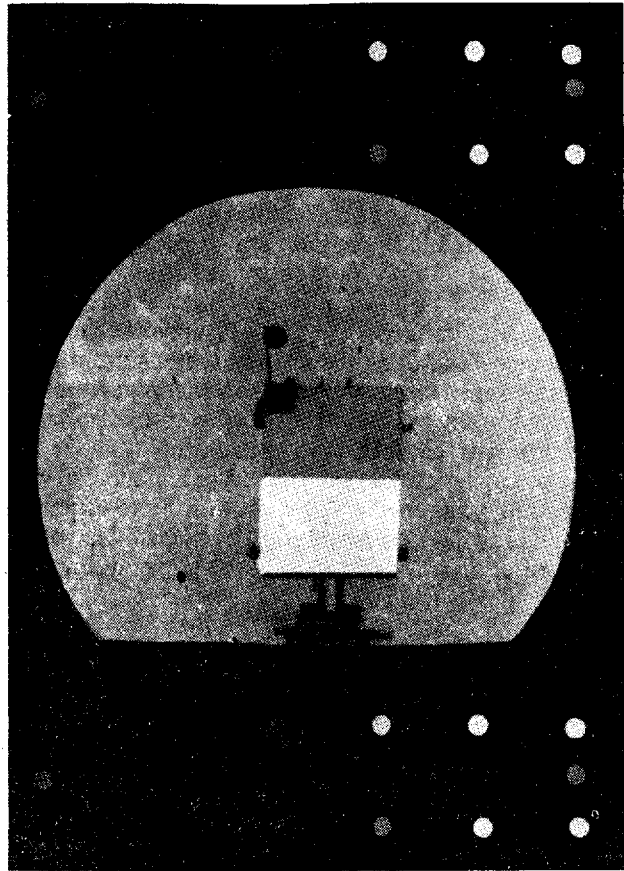


Рис. 71. Фотометрически калиброванный снимок стандартизационного экрана.

ночного p_1 и дневного p_2 . Обозначая соответствующие значения воздушных масс через M_1 и M_2 , для редуцированных за экстинкцию значений будем иметь $b_1 p_1^{-M_1}$ и $e_2 p_2^{-M_2}$.

Для получения по этим данным интересующего нас значения A_B необходимо иметь значение множителя k , служащего

для перехода от системы произвольных единиц иллиуминометра к системе тоже произвольных, но других единиц телефотометра. Обозначая солнечную освещенность, выраженную в этих последних, через e_1 , определяем множитель k соотношением

$$e_1 = k e_2. \quad (10)$$

Постоянная k является основной константой данного метода. Для ее определения необходим тщательно поставленный эксперимент, осуществляемый согласно нижеследующей схеме.

Вообразим себе поверхность весьма высокой яркости B_0 . Эта яркость должна быть точно одинакова во всех точках поверхности и строго постоянна в течение всего времени эксперимента, но знать ее абсолютное значение нет надобности. Поверхность располагается так, чтобы ее яркость можно было измерить телефотометром и получить ее значение b_{01} в единицах этого прибора. Затем эта же поверхность помещается на точно известном расстоянии L от экрана иллиуминометра, и последним измеряется освещенность e_{02} лучами этой поверхности. Обозначим площадь излучающей поверхности через S (в случае надобности эта площадь может быть ограничена специально поставленной прецизионной диафрагмой). Тогда для освещенности e_{02} получаем выражение

$$e_{02} = \frac{b_{02} S}{L^2} = \frac{b_{01} S}{k L^2}, \quad (11)$$

откуда и находим k :

$$k = \frac{b_{01} S}{e_{02} L^2}. \quad (12)$$

Имея k , легко получаем A_B :

$$A_B = \frac{\pi b_1}{e_{п1}} = \frac{\pi b_1}{k e_2} \frac{p_1^{M_1}}{p_2^{M_2}} \frac{\Delta_p^2}{\Delta_s^2}, \quad (13)$$

где $e_{п1}$ — солнечная освещенность на расстоянии планеты, Δ_p — радиус-вектор последней в момент измерения яркости b_1 , а Δ_s — радиус-вектор Земли в момент измерения освещенности e_2 .

Основным преимуществом этого метода является простота дневных наблюдений солнечного света, которые выполняются не самим телефотометром (что, как мы видели выше, на больших инструментах довольно неудобно), а небольшими переносными приборами. Например, для этой цели можно применить фотометр Вебера, тубус-фотометр, поляризационный фотометр Мартенса, а также специально сконструированные для таких

измерений клиновой солнечный фотометр и универсальный клиновой фотометр.

Метод с успехом применяется не только в визуальной, но и в фотографической фотометрии, для чего Н. Н. Сытинской построен специальный фотографический иллюминометр.

IV. Метод сравнения с яркостью фотосферы. Пусть телефотометр, которым выполняется наблюдение, устроен так, что при его помощи можно выполнять сравнение яркости b участка диска планеты с яркостью b_{ϕ} фотосферы в центре солнечного диска, т. е. получить отношение b/b_{ϕ} . Это последнее исправляем за атмосферную экстинкцию, умножив на множитель p_c^M/p_{Π}^M .

Солнечная освещенность E на расстоянии Δ планеты может быть выражена равенством

$$E = \bar{B}_{\phi}\omega, \quad (14)$$

где $\bar{B}_{\phi}$ — средняя яркость солнечного диска, а ω — телесный угол, под которым с этого расстояния виден диск Солнца; если линейный радиус Солнца положить равным R , то будем иметь:

$$\omega = \frac{\pi R^2}{\Delta^2}, \quad (15)$$

причем ω будет выражено в стерadianах. Средняя яркость $\bar{B}_{\phi}$ меньше яркости B_{ϕ} в центре диска, что мы выражаем множителем η :

$$\frac{\bar{B}_{\phi}}{B_{\phi}} = \eta. \quad (16)$$

Этот множитель можно выразить через закон $\psi(x)$ изменения яркости солнечного диска с угловым расстоянием x от центра последнего:

$$\eta = \frac{2}{x_0} \int_0^{x_0} \psi(x) x dx, \quad (17)$$

где x_0 — угловой радиус солнечного диска с данной планеты. Если выполнить расчет η для эффективной длины волны, соответствующей визуальной части спектра, со значениями $\psi(x)$, полученными Абботом из спектрофотометрических наблюдений, то получим $\eta = 0,16$.

Имея η , можем написать:

$$E = \pi \bar{B}_{\phi} x_0^2 = \eta B_{\phi} \frac{\pi R^2}{\Delta^2}. \quad (18)$$

Это приводит нас к такому выражению для расчета A_v :

$$A_v = \frac{\pi B}{E} = \frac{b}{b_{\phi}} \frac{p_c^M}{p_{\Pi}^M} \frac{\Delta^2}{\eta R^2}. \quad (19)$$

Теоретически вышеописанный метод представляется довольно изящным, однако применение его на практике наталкивается на громадные затруднения, связанные с необходимостью точно определять отношение b/b_{ϕ} , имеющее величину порядка $10^{-4} - 10^{-5}$. Этому следует приписать то обстоятельство, что в литературе по фотометрии как планет, так и солнечной короны нельзя найти ни одного примера удачного применения этого метода.

V. Метод внефокальных изображений звезд. Этот метод, который по времени первого его применения является самым старым, основан на том, что сравнение яркости планеты с солнечным светом выполняется не прямо, а через посредство звезд. Сравнение яркости поверхностного объекта с точечным изображением звезды непосредственно может быть осуществлено только фотоэлектрическим путем; в визуальной и фотографической фотометрии оно невозможно. Вследствие этого приходится превращать точечное изображение звезды в площадку, что осуществляется прежде всего путем выведения звезды из фокуса.

Техника применения внефокальных изображений звезд для измерения яркости поверхностных объектов разрабатывалась Гетцем, А. В. Марковым и Н. Н. Сытинской. Наиболее плодотворным этот метод оказался в фотографической фотометрии, почему здесь мы и ограничимся элементарным изложением его фотографического варианта.

Наблюдение сводится к тому, что на одном и том же негативе при одинаковой продолжительности выдержки получают фокальное изображение планеты и внефокальное изображение звезды сравнения. Мы будем в дальнейшем предполагать, что плотность последнего во всех точках одинакова и соответствует равномерной освещенности e_s всего изображения на эмульсионном слое во время экспозиции. Кроме того, на негативе должна быть получена фотометрическая шкала посредством трубчатого фотометра или иным образом, через которую можно найти отношение e_{Π}/e_s освещенности эмульсионного слоя на изображениях планеты и звезды.

Снимки звезды и планеты можно сделать при точно одинаковых зенитных расстояниях и быстро один за другим. Если это осуществлено, то атмосферное ослабление можно считать из результата сравнения исключенным, что составляет главное преимущество рассматриваемого метода перед всеми рассмотренными

ранее. Если равенство зенитных расстояний осуществить не удалось, то отношение e_n/e_s исправляется за дифференциальную экстинкцию.

Освещенность e_n в точке изображения планеты, имеющей яркость B_n , выражается известным равенством:

$$e_n = \tau B_n \frac{\pi R^2}{F^2}, \quad (20)$$

где τ — коэффициент пропускания оптической системы астрографа, R — радиус его входного зрачка, а F — главное фокусное расстояние. Для освещенности e_s внефокального диска звезды легко выводится выражение

$$e_s = \tau E_s \frac{F^2}{\Delta F^2}, \quad (21)$$

где E_s — блеск звезды, а ΔF — линейное смещение с фокуса, т. е. расстояние плоскости эмульсионного слоя фотопластинки от главной фокальной плоскости астрографа. Вспоминая, что B_n через световую солнечную постоянную E_{0c} выражается равенством

$$B_n = A_n \frac{E_{0c}}{\Delta_n^2}, \quad (22)$$

мы из формул (20), (21) и (22) получим:

$$A_n = \frac{e_n}{e_s} \frac{F^2}{\Delta F^2} \frac{F^2}{\pi R^2} \frac{E_s}{E_{0c}} \Delta_n^2. \quad (23)$$

Основной константой в этом методе является отношение E_s/E_{0c} , которое находится через величину звезды m_s и звездную величину Солнца m_c :

$$\lg \frac{E_s}{E_{0c}} = -0,4(m_s - m_c). \quad (24)$$

Поскольку каталожные величины звезд даются с погрешностью до $\pm 0^m,1$, а иногда и больше, а звездная величина Солнца m_c тоже известна очень неточно, особенно для фотографической системы величин, эта постоянная не может быть получена с нужной степенью точности, что составляет один из основных недостатков данного метода стандартизации.

Источником затруднений является также неравномерная плотность изображения внефокальных звездных дисков. Она возникает от различных причин. Чаще всего наблюдается симметричный ход плотности с расстоянием от центра диска, который уменьшается с увеличением радиуса последнего. В других случаях на диск проектируются в виде пятен дефекты объектива или находящиеся на пути конуса лучей предметы, например зеркальце, служащее для освещения поля зрения на визуальных рефракторах. При коротких выдержках (порядка 1 секунды и меньше) на диске становятся заметными неправильные пятнистые тени, меняющиеся

от одной экспозиции к другой и вызванные мерцанием. При наличии подобных явлений приходится выполнять подробное изучение распределения освещенности по внефокальному диску и определение среднего значения путем интегрирования по всей его площади. Детали, касающиеся этого процесса, излагаются в специальных работах.

Необходимо еще иметь в виду, что поскольку радиус внефокального диска равен $\Delta F \cdot R/F$, а отношение R/F для разных инструментов различается не сильно, радиус диска будет, вообще говоря, пропорционален ΔF . Но при данном ΔF освещенность e_s , как следует из формулы (21), пропорциональна квадрату фокусного расстояния F^2 . Из этого видно, что метод внефокальных звезд выгоден главным образом при длиннофокусных инструментах, когда диск достаточного размера и приемлемой однородности имеет освещенность e_s одного порядка с e_n . На короткофокусных инструментах внефокальные диски получаются слишком слабыми, и сравнение их с ярким изображением планеты требует специальных приспособлений, например диафрагмирования объектива при съемке планеты, что вносит дополнительные осложнения.

Несмотря на все перечисленные недостатки, метод внефокальных звезд относится к числу излюбленных и широко применяемых методов стандартизации, что связано с его удобствами, определяемыми отсутствием экранов или других специальных стандартизационных приспособлений, а также отдельных дневных наблюдений солнечного света. Что касается до его малой точности, то этот недостаток компенсируется надежным и простым исключением атмосферного ослабления, которое является трудно устранимым источником систематических погрешностей при других методах.

§ 42. Измерения светлоты в лабораторных и полевых условиях

Как было сказано в § 32, интерпретация измерений отражательной способности поверхности Луны и планет основана на сопоставлении с аналогичными данными для земных образований. Поэтому вопросы лабораторного и полевого исследования отражательной способности различных материалов представляют для планетоведения очень большой интерес. Вполне естественно также, что в общем комплексе данных по светлоте и цвету планет необходимо иметь данные и о планете Земле.

Исследование отражательной способности земных образований, как для отдельно взятых образцов, так и для обширных участков земной поверхности в их естественных условиях, составляет раздел геофизики, называемый *геофотометрией* или *оптикой ландшафта*. Эта отрасль знания была разработана главным образом трудами советских ученых — Н. Н. Калинина, Г. А. Тихова, Е. Л. Крипова и др.

Методы лабораторных определений светлоты или коэффициента яркости можно разделить на относительные и абсолютные. Первые основаны на сравнении с экраном-образцом, для которого отражательная способность уже известна из прежних определений, в то время как вторые к ранее выполненным фотометрическим измерениям не прибегают. Абсолютные методы связаны с осуществлением довольно сложного эксперимента, поэтому их применяют преимущественно для исследования образцовых экранов, используемых потом для относительных измерений.

Для абсолютного определения коэффициента яркости могут быть указаны два основных пути, из которых первый мы назовем *сравнением освещенностей*. При его применении нужна нормальная лампа с силой света I ; знать эту силу света не требуется, поскольку r от единицы светового потока не зависит; необходимо только постоянство I во время опыта. Располагаем лампу на расстоянии L_1 от приемного экрана какого-нибудь фотометра; пусть угол падения света на этот экран будет i_1 . Тогда из отсчета фотометра находим освещенность:

$$E_1 = \frac{I}{L_1^2} \cos i_1, \quad (25)$$

выраженную в произвольных единицах. Затем освещаем той же лампой исследуемую поверхность, площадь которой пусть будет S . При расстоянии от лампы до этой поверхности L_2 и угле падения i_2 освещенность E_2 этой поверхности будет:

$$E_2 = \frac{I}{L_2^2} \cos i_2.$$

Освещенная лампой поверхность теперь сама служит источником излучения, сила света I_3 которого в направлении, составляющем угол i_3 с нормалью, определяется следующим равенством:

$$I_3 = SB \cos i_3 = r \frac{IS}{L_2^2} \cos i_2 \cos i_3.$$

Если в направлении i_3 на расстоянии L_3 от поверхности расположить приемный экран того же фотометра, то при угле падения лучей на этот экран i_4 освещенность E_3 экрана будет:

$$E_3 = \frac{I_3}{L_3^2} \cos i_4 = r \frac{SI}{L_2^2 L_3^2} \cos i_2 \cos i_3 \cos i_4. \quad (26)$$

Отсчеты фотометра при первом и втором измерениях позволяют найти отношение E_1/E_3 ; отсюда, деля (26) на (25), находим:

$$r = \frac{E_3}{E_1} \frac{L_2^2 L_3^2}{SL_1^2} \frac{\cos i_1}{\cos i_2 \cos i_3 \cos i_4}. \quad (27)$$

Практически эксперимент удобно вести так, чтобы $i_1 = i_2 = i_3 = 0$, благодаря чему (27) принимает вид:

$$r = \frac{E_3}{E_1} \frac{L_2^2 L_3^2}{L_1^2 S \cos i_4}. \quad (28)$$

Удобство описанного метода состоит в том, что вследствие произвольности расстояний L_1 , L_2 и L_3 их можно выбирать так, чтобы E_3 мало отличалось от E_1 , что важно при работе с фотометром, имеющим малый интервал измеряемых освещенностей. Но, с другой стороны, в целях сохранения закона квадратов расстояний расстояние L_3 всегда приходится брать большим в сравнении с площадью S , вследствие чего освещенность E_3 получается очень малой по абсолютной величине, особенно при малых r . Указанные особенности делают метод «сравнения освещенности» особенно пригодным для измерений фотографическим путем, где малая величина освещенности не служит помехой. Сравнение же сильно разнящихся освещенностей невозможно без дополнительных приспособлений.

Второй путь абсолютного определения коэффициента яркости мы назовем *сравнением яркостей*. Он основан на применении телефотометра. Для опыта требуется источник света в виде равномерно светящейся поверхности S , имеющей во всех точках одинаковую яркость B_1 ; желательно, чтобы эта яркость была возможно больше. Первым наведением телефотометра измеряем яркость источника B_1 (в произвольных единицах). Затем освещаем источником исследуемую поверхность. Если расстояние до нее равно L , угол излучения i_1 , а угол падения на поверхность i_2 , то освещенность E поверхности окажется равной

$$E = \frac{SB_1}{L^2} \cos i_1 \cos i_2, \quad (29)$$

откуда находим ее яркость $B_2 = rE$.

Эту яркость мы также измеряем телефотометром. Из отсчетов телефотометра находим отношение яркостей B_1/B_2 , а отсюда получаем и r :

$$r = \frac{B_2}{B_1} \frac{L^2}{S \cos i_1 \cos i_2}. \quad (30)$$

При данном способе нетрудно добиться, чтобы яркости B_1 и B_2 были достаточно велики для удобного измерения, но отношение их будет непременно очень большим (примерно от 100 : 1 до 1000 : 1), а потому телефотометр должен обладать большим интервалом сравниваемых яркостей. Эти особенности заставляют рекомендовать способ «сравнения яркостей» для визуальных измерений клиновыми или поляризационными приборами.

Два основных принципа измерения r , описанные выше, на практике могут применяться в различных вариантах. Так, удобной

оказалась предложенная Н. Н. Сытинской схема, представляющая собой комбинацию обоих путей: источник света, используемый в методе «сравнения яркостей», сам устраивается в виде просвечивающего экрана, расстояние которого от освещающей его лампы можно менять, изменяя тем самым в точно известном отношении яркость B_1 . Этим достигается то преимущество, что при значительной абсолютной величине яркости B_2 можно иметь отношение измеряемых яркостей B_1/B_2 не слишком большим.

Как было указано выше, на практике обычно прибегают к относительным методам получения r и r_0 . Они основаны на сравнении яркости B данного образца с яркостью B_0 такой поверхности, для которой значение светлоты r_0 уже известно. Обе сравниваемые поверхности должны находиться в строго одинаковых условиях освещения, причем фотометрическое измерение дает отношение B/B_0 их яркостей, после чего значение светлоты r для испытуемого образца получается по известной формуле:

$$r = r_0 \frac{B}{B_0}. \quad (31)$$

В качестве объекта сравнения может быть использован тщательно сохраняемый стандартный экран, для которого значение r_0 определено одним из абсолютных методов и с которым периодически сравниваются рабочие экраны, используемые для полевых или обсерваторских работ. Можно получать стандартные экраны, изготовленные из прессованного порошкообразного барита (BaSO_4), из Всесоюзного института метрологии (Ленинград), где имеется специальный набор образцовых экранов, составляющий эталон светлоты, с которым и сравниваются поставляемые заказчикам копии. Правда, сообщаемое при этом значение r относится только к визуальной световой системе, но это не препятствует применять баритовые экраны для других участков спектра ввиду их нейтральности.

При работах невысокой точности допускается применение в качестве стандартной поверхности магнезии, т. е. окиси магния (MgO). В этом случае белая пластинка (фарфор, гипс, матированное серебро) покрывается окисью магнезии путем копчения в струе белого дыма, поднимающегося над горящим металлическим магнием. Правила, установленные для такой процедуры, требуют, чтобы сжигаемый магний был химически чистым, а слой магниевой копоти на белой (серебряной) подложке имел толщину не менее 0,3 мм. В этих условиях для полученного экрана можно принимать $r_0=1$. Обстоятельства иногда вынуждают применять вместо химически чистого продажного магния в виде стружек или ленты, что может повести как к снижению полученного значения r_0 , так и к появлению селективности, причем примеси железа дают желтоватую окраску, хром и медь—зеленоватую, а кобальт—синеватую.

Экраны, применяемые для практической работы в обсерваторских или полевых условиях, должны отличаться достаточной прочностью и стойкостью в отношении различных атмосферных влияний—качества, которых лишены пластинки из магнезии и барита. В то же время они должны обладать удовлетворительной ортотропностью. В качестве материала для полевых экранов были предложены гипс, гипс с примесью окиси магния, шероховатый фарфор, матированное молочное стекло и белый мрамор. Последние три выгодны тем, что в случае загрязнения их легко отмыть до прежнего состояния.

Относительный метод определения r является общеупотребительным при определении светлоты естественных объектов природного ландшафта. В этом случае равенство освещенностей достигается тем, что экран просто кладется на изучаемый участок грунта, с которым и сравнивается фотометрически. Этим путем был получен обширный материал по отражательной способности различных объектов ландшафта в смешанном свете, опубликованный в ряде статей и сообщений. Е. Л. Кринов этим же методом определял значения $r=r(\lambda)$ для монохроматического излучения, причем сравнения спектральной яркости объекта с экраном выполнялись методом фотографической спектрофотометрии, для чего использовались специально разработанные варианты легких полевых спектрографов. Результатом многолетней работы в этом направлении явился каталог кривых $r(\lambda)$ для большого числа естественных объектов.

Описанный метод измерения оказывается менее удобным в отношении покровов с значительным вертикальным простираем, как, например, травостоя, посевов, мелкого кустарника, поскольку в этом случае экран приходится устанавливать на специальном штативе, приподнимая его до уровня верхней границы покрова, соответственно чему и наблюдатель с прибором тоже должен располагаться выше. В этом случае удобно пользоваться автомашиной с выдвижной телескопической вышкой. Наконец, для объектов с очень значительным вертикальным простираем, как, например, для высокого кустарника и древостоя, измерения возможны только с летательных аппаратов: самолетов, вертолетов, привязных аэростатов и т. п. В этом случае используются специальные методы стандартизации по экрану, расположенному на самом самолете, составляющие предмет так называемой *аэрофотометрии*.

Весьма важную задачу составляет изучение изменения светлоты с направлением падающего и отражаемого лучей. Поскольку результатом такого измерения является индикатриса отражения, самый процесс таких измерений называют *индикатометрией*, а предназначенные для его выполнения установки—*индикатометрами*. Из последних упомянем «яркомер», сконструированный П. М. Тиходеевым, и индикатометр, построенный на Астрономической обсерватории Ленинградского университета. Установки

такого типа состоят из столика для крепления образцов, осветителя-коллиматора и фотометра, причем все эти части соединены между собой поворотным устройством, снабженным кругами с градусными делениями, что позволяет вести измерения при любой комбинации углов i , ε и a . В качестве индикатора могут быть использованы и некоторые образцы поворотных штативов, входящих в комплект оборудования светомерной скамьи и предназначенных для изучения силы света ламп в различных направлениях.

Результат индикаторного испытания некоторого материала представляется в виде собрания индикатрис, каждая из которых соответствует определенному значению угла падения лучей i и дается в форме графика или таблицы. Такой материал громоздок, неудобен для сопоставления и редко оправдывает себя с точки зрения планетоведения, поскольку нет аналогичного материала для поверхностей небесных тел. Поэтому нередко ограничиваются измерениями только в плоскости падения освещающих лучей, т. е. при $a=0^\circ$ и $a=180^\circ$.

Дальнейшее упрощение задачи сводится к применению параметров, характеризующих закон отражения одним числом или группой чисел. Так, Н. Н. Сытинская нашла, что если наблюдать образец со стороны источника света (что соответствует наблюдению планеты в противостоянии), то яркость B меняется в зависимости от угла $i=\varepsilon$ по эмпирическому закону:

$$B = B_0 \cos^q i, \quad (32)$$

где B_0 и q — параметры, полученные из наблюдательного материала, причем величина q возрастает со степенью гладкости поверхности, почему для нее и предложено наименование *фактор гладкости*. Если значение светлоты при $i=\varepsilon=0$ обозначить через r_0 , то формула (32) приводит к выражению

$$r = r_0 \cos^{q-1} i. \quad (33)$$

Изучение закона изменения r с направлениями в лабораторной обстановке возможно далеко не для всех объектов, что выдвигает задачу выполнения таких измерений в полевых условиях. В. С. Кулебакин пользовался для этой цели искусственным светом, получаемым от прожектора и направляемым на исследуемый участок почвы под разными углами. Е. Л. Кринов выполнял такие измерения при естественном свете, пользуясь изменениями высоты Солнца над горизонтом, но это не даст индикатрисы в том понимании этого термина, какой мы ему дали выше, поскольку земная поверхность освещается суммарным светом, поступающим от Солнца и неба совместно. Техника освобождения результатов таких измерений от эффекта рассеянного света была разработана Н. С. Орловой, которая пользовалась для измерений клиновым фотометром специальной конструкции, соединявшей в себе телефотометр с теодолитной установкой для отсчета азимутов и зенит-

ных расстояний. Принцип метода Орловой состоит в том, что яркость объекта в заданном направлении измеряется дважды: сначала при суммарной освещенности от Солнца и неба совместно, а потом в условиях затенения специальным щитом (в некоторых случаях кучевым облаком), т. е. при одной рассеянной освещенности. Разность измеренных яркостей дает ту яркость, которая была бы получена в условиях освещения только солнечным светом при отсутствии света неба.

Просмотр индикатрис, полученных для различных материалов в лабораторных и полевых условиях, показывает, что они могут быть крайне разнообразны. Однако в этом разнообразии намечается несколько преобладающих типов, что позволяет построить классификацию объектов по характеру рассеяния света. В общем, все виды материалов по форме индикатрисы могут быть разделены на следующие четыре типа:

Тип А. Ортотропные. Яркость поверхности практически одинакова во всех направлениях и с изменением угла i падения освещающего потока лучей меняется пропорционально косинусу этого угла. Коэффициент яркости остается постоянным при всех условиях освещения и для всех направлений. Индикатриса имеет форму полусферы.

К этому типу должны принадлежать всякого рода экраны, употребляемые при фотометрических работах и, в частности, при практическом измерении коэффициентов яркости различных объектов. Поэтому техника изготовления таких экранов представляет собою важную задачу. Белая пластинка, покрытая окисью магния или серноокислым барием, матированный фарфор, гипс и некоторые другие материалы дают удовлетворительное приближение к условию ортотропности. В природе такой тип индикатрисы встречается редко. К нему приближаются гладкие матовые покровы, состоящие из мелких прозрачных или полупрозрачных элементов: мелкозернистый песок, снег и т. п. (рис. 72, А).

Тип Б. Зеркальные. Поверхность наряду с рассеянием дает заметное зеркальное отражение, проявляющееся в резком увеличении яркости для направления зеркально отраженного луча, причем для этого направления наблюдается также заметная поляризация. Индикатриса рассеяния сильно вытянута в направлении зеркального отражения.

К этому типу относятся: лед, снег, покрытый настом, и всякого рода гладкие поверхности в мокром состоянии (рис. 72, Б).

Тип В. Изрытые. Поверхность покрыта множеством неровностей той или иной формы, совершенно непрозрачных и потому дающих тени. При наблюдении со стороны источника света наблюдатель видит перед собою только освещенные элементы неровностей и, следовательно, воспринимает поверхность наиболее яркой; эффект усиливается тем, что часть элементов неровностей

будет расположена к лучам приблизительно нормально и потому будет иметь освещенность, близкую к максимальной. При наблюдении с других направлений к наблюдателю будут в какой-то мере обращены и затененные части неровностей, а потому яркость будет меньше, чем при наблюдении со стороны источника света. В результате получается индикатриса, вытянутая вдоль падающего луча к источнику света, причем минимальная яркость лежит в плоскости падающего луча на стороне, противоположной источнику, т. е. приблизительно в направлении зеркально отраженного луча.

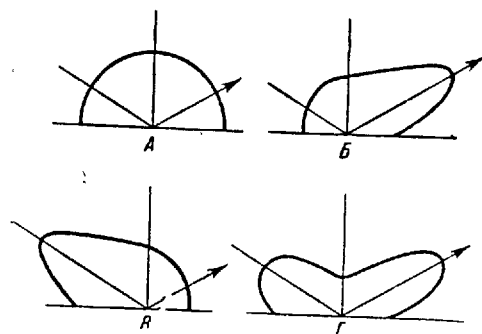


Рис. 72. Основные типы индикатрис рассеяния матовыми поверхностями.

К этому весьма распространенному в природе типу относятся всякие неровные и иссеченные поверхности, лишенные зеркальности, как, например, вскопанная почва, нагромождения щебня и гальки, большая часть растительных покровов (рис. 72, B).

Тип Г. Смешанные. Сюда относятся изрытые поверхности, неровности которых

обладают значительной зеркальностью. Для таких поверхностей наблюдаются два максимума значений r : один в направлении на источник света, другой — в направлении зеркально отраженного луча, в то время как в направлениях, близких к нормали к поверхности, r оказывается минимальным (рис. 72, Г).

Этот случай мы имеем, например, для галечников и вскопанной почвы в мокрую погоду, когда смоченные поверхности и лужицы в их углублениях сильно зеркалят, а также для некоторых растительных покровов, составленных из растений, богатых прозрачными усиками и щетинками, создающими подобно каплям воды зеркалящий эффект.

При интерпретации результатов абсолютных фотометрических наблюдений, выраженных в форме индикатрисы рассеяния, необходимо иметь в виду, что последняя далеко не всегда является характерным признаком того или иного покрова. Рассеяние света во многих случаях определяется состоянием самого верхнего поверхностного слоя материала и может в колоссальной степени меняться с его структурой. Искусственно выполняемое матирование и полирование различных материалов, изменяющее то специфическое их свойство, которое художники выражают словом «фактура», а вместе с ним и индикатрису рассеяния, служит тому примером. Из природных явлений, способных быстро менять индикатрису, отметим два: намокание и запыление.

При намокании на поверхности различных деталей образуется жидкая пленка, которая дает значительное зеркальное отражение и потому сообщает свойство зеркальности или глянцеваемости всем объектам ландшафта. В результате под Солнцем на мокрой поверхности появляются яркие, часто слепящие блики, световые пятна, иногда целая полоса бликов, причем отраженный свет приобретает заметную поляризацию. Таким образом, индикатриса для одной и той же поверхности в сухом и мокром состоянии получается совершенно различной. Общее правило состоит в том, что поверхности типа А при намокании переходят в тип В, а поверхности типа В — в тип Г.

Запыление, т. е. образование на поверхности данного материала тонкого пылевого покрова, действует в направлении, противоположном намоканию. Придавая всякой поверхности матовый характер, пылевой слой ослабляет или даже совсем устраняет зеркальное отражение, сглаживая максимум индикатрисы в направлении зеркально отражаемого луча. В результате этого объекты типа В переходят в тип А, а объекты типа Г — в тип В. Аналогичным

Таблица 37

Средние значения светлоты земных образований в визуальных лучах

Название	r	Название	r
Луг зеленый сочный	0,064	Песок кварцевый белый сырой	0,12
» » суходольный	0,070	Песок кварцевый белый мокрый	0,08
» » скопленный	0,065	Песок кварцевый желтый сухой	0,15
» желтый (выжженный) нормально	0,14	Песок кварцевый красный	0,10
Луг желтый под косым углом	0,20	Почва супесчаная сухая	0,13
Степь желтая сухая	0,10	» » мокрая	0,06
Посев зеленый	0,055	» суглинистая сухая	0,15
» зрелый (желтый) нормально	0,15	» » мокрая	0,05
Посев зрелый (желтый) под косым углом	0,34	» чернозем сухой	0,03
Жнивьё	0,10	» » мокрый	0,02
Моховое болото	0,050	Море (у берегов США)	0,068
Лес хвойный (кроны)	0,040	Океан (Атлантический)	0,035
» лиственный летом	0,050	Снег свежесвалившийся	1,00
» » в осеннем уборе (желтый)	0,15	» средней свежести	0,90
Лес лиственный зимой	0,07	» тающий	0,80
Песок кварцевый белый сухой нормально	0,20	Снежное поле с редкой порослью	0,60
Песок кварцевый белый под углом	0,35	Лед речной	0,35

образом будет действовать легкая запорошенность снегом, налет матовой мохнатой изморози и другие аналогичные явления.

Что касается абсолютных значений светлоты r , то некоторую ориентировку в области ее средних значений читатель получит, просматривая табл. 37. При этом следует иметь в виду, что приведенные в ней данные носят в известной мере условный характер, поскольку отражательная способность материала данного наименования может изменяться в очень широких пределах.

Изменение отражательной способности по спектру характеризуется графиком или таблицей, представляющими ход с длиной волны λ либо альбедо $A(\lambda)$, либо светлоты $r(\lambda)$. Такие материалы, помимо указанных выше работ Е. Л. Кринова, были получены фотоэлектрическим путем для ряда естественных образований Е. К. Пудейко. Обширные материалы этого рода имеются также для красящих веществ, что, однако, не представляет интереса с точки зрения планетоведения.

Как суррогат спектрофотометрии нередко применяется *колориметрия*. С точки зрения астрономических приложений наиболее удобным представляется выражение закона $r(\lambda)$ в форме показателя цвета, который в данном случае относится к абсолютно белой поверхности как к нуль-пункту. Обозначим яркость изучаемого объекта в фотографических лучах через B_{ϕ} , в визуальных — B_{ν} , соответствующие яркости абсолютно белого экрана, находящегося в точно таких же условиях освещения, через $B_{A\phi}$ и $B_{A\nu}$. Тогда показатели цвета C и C_A для объекта и экрана, которые используются в звездной астрономии, будут:

$$\left. \begin{aligned} C &= -2,5 \lg B_{\phi} + 2,5 \lg B_{\nu}, \\ C_A &= -2,5 \lg B_{A\phi} + 2,5 \lg B_{A\nu}. \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Характеристикой изменения отражательной способности по спектру, как и в случае интегрального блеска планеты, будет служить показатель желтизны, т. е. разность этих величин, которую мы обозначим через D :

$$D = C - C_A = -2,5 \lg \frac{B_{\phi}}{B_{A\phi}} \frac{B_{A\nu}}{B_{\nu}} = -2,5 \lg \frac{r_{\phi}}{r_{\nu}}, \quad (35)$$

где $r_{\phi} = B_{\phi}/B_{A\phi}$ и $r_{\nu} = B_{\nu}/B_{A\nu}$ — значения светлоты в фотографическом и визуальном участках спектра.

Таким образом, определение величины D сводится к измерению светлот в нормальной фотографической и визуальной или (что для практики удобнее) фотовизуальной фотометрической системах, что легко осуществляется методами фотографической фотометрии. Другой метод измерения, уже описанный в § 35 в связи с интегральной колориметрией планет, основан на использовании

визуального фотометра-колориметра, снабженного синим клином перед лампой сравнения.

Изучение многочисленных материалов по спектральной отражательной способности природных покровов позволяет разделить последние по характеру кривой $r(\lambda)$ на следующие группы:

I класс — нейтральные. Кривая $r(\lambda)$ дает ряд неправильных небольших волн, но не обнаруживает монотонного хода вдоль спектра. Сюда относятся: снег, лед, некоторые горные породы белого, серого и черного цвета, кое-какие формы мертвых растительных покровов (рис. 73).

II класс. Кривая $r(\lambda)$ монотонно повышается от фиолетового конца спектра к красному. Форма кривой может быть весьма разнообразной: прямая линия того или иного наклона, кривые, обращенные выпуклостью вверх или вниз, S-образные кривые с точкой перегиба или кривые с рядом неправильно чередующихся волн. В зависимости от этого меняется и цвет объекта. Так, при незначительном наклоне и большой общей высоте кривой

объект кажется светло-желтым, розоватым или кремовым. При пологой кривой и низких значениях $r(\lambda)$ окраска будет желтовато-серой или коричневатой-серой. Крутой ход кривой при высоких $r(\lambda)$ дает красные и оранжевые тона довольно высокой насыщенности, а при низких $r(\lambda)$ — темно-коричневые, бурые, рыжие оттенки.

К рассматриваемому классу относится подавляющее большинство минералов, горных пород, форм коры выветривания, а также образцов мертвой, сухой растительности (рис. 74).

III класс. Зеленые растительные объекты, окрашенные хлорофиллом. Характерны специфического вида кривой $r(\lambda)$, которая идет почти параллельно оси абсцисс в сине-фиолетовой части спектра, дает более или менее высокий максимум на длине волны 560 мμ, резко выраженный минимум около 650 мμ и вслед за тем быстрый рост в инфракрасной части спектра. В результате в инфракрасных лучах зеленая растительность по близости оказывается сравнимой со снегом (рис. 75).

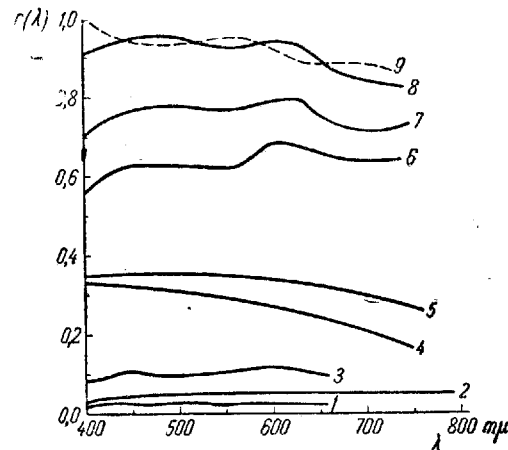


Рис. 73. Кривые спектральной светлоты объектов I и IV классов. (По Е. Л. Кринову.) 1 — мокрый чернозем, 2 — влажная суглинистая почва, 3 — серые валуны, 4 — полярная шапка Марса, 5 — лед речной, 6, 7 — тающий снег, 8, 9 — свежий снег.

Высота как зеленого максимума, так и отражательной способности в инфракрасных лучах различна; она является наибольшей для свежей молодой ярко-зеленой растительности. Встречаются и такие случаи, когда минимум на 650 мμ выражен очень неясно, примером чего может служить крона сосны. В зимних условиях даже у зимнезеленых растений особенности кривой сглаживаются.

IV класс. Кривая $r(\lambda)$ монотонно поднимается от красного конца спектра к фиолетовому, благодаря чему объект имеет цвет голубого, синего или фиолетового тона. Типичным объектом этого

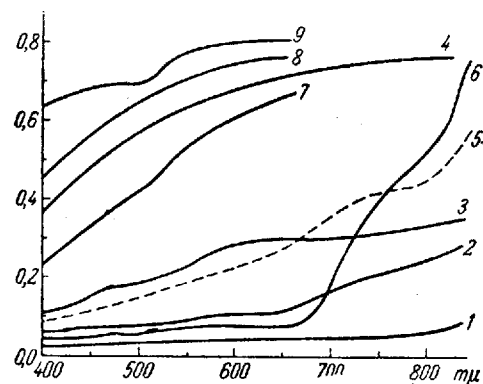


Рис. 74. Кривые спектральной светлоты объектов II класса. (По Е. Л. Кринову.) 1—4—средние данные для некоторых групп объектов (пески и почвы), 5—сырой лёсс, 6—высохшая степь, 7—сухая глина, 8—глинистый сланец, 9—зимняя дорога.

рода является атмосфера и образуемый ею голубой небесный свод. Что касается до твердых покровов земной поверхности, то среди них объекты этого типа мало распространены. Достаточно сказать, что среди 370 объектов каталога Кринова нет ни одного, который мог бы быть бесспорно отнесен к этому классу. Среди минералов и венчиков цветов, конечно, можно найти немало образцов голубого, синего и фиолетового цвета, но они нигде не встречаются в таких количествах, чтобы составлять обширные сомкнутые покровы, определяющие цвет участков ландшафта планетного масштаба. Впрочем, возможно, что к рассматриваемому классу могут быть отнесены некоторые виды льдов. По крайней мере, судя по картинам некоторых художников и по хромолитографиям в книгах, скопления полярных льдов и горные глетчеры обладают голубоватой или голубовато-зеленой окраской. Однако такая окраска может быть следствием отражения голубого неба в зер-

кальной поверхности льдов. Что же касается до спектрофотометрических исследований льда различного происхождения, то их

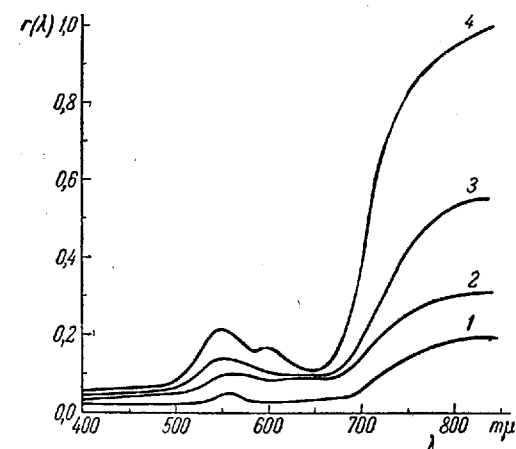


Рис. 75. Кривые спектральной светлоты для объектов III класса. (По Е. Л. Кринову.) 1—хвойный лес зимой, 2—хвойный лес летом, 3—лиственный лес летом, 4—свежий зеленый луг.

в настоящее время опубликовано немного, а результаты их довольно противоречивы. Мы пока не располагаем также кривыми $r(\lambda)$ для океанов, морей и прочих водоемов.

§ 43. Фотометрическое исследование поверхности Луны

Лунный диск благодаря его большим угловым размерам является наиболее доступным объектом для применения методов поверхностной фотометрии вообще и для изучения отражательной способности в частности.

Уже Галилей в XVII в. отметил ту его особенность, которую на современном языке мы назвали бы отсутствием потемнения к краю диска и которая состоит в том, что в полнолуние центр и края лунного диска представляются одинаковыми по яркости, хотя угол падения солнечных лучей к краю возрастает. Галилей правильно объяснил эту особенность изрытостью лунной поверхности, благодаря которой при любом угле падения на поверхность лунного шара множество элементов неровностей будут перпендикулярны к направлению лучей. Основы математической теории этого явления впервые дал П. Бугер в XVIII в., который проделал также некоторые фотометрические измерения лунного диска и на основании полученных результатов пытался определить углы наклона микродеталей к поверхности шара.

В дальнейшем по аналогии с глазомерными оценками звездных величин были предложены глазомерные шкалы для оценки яркости объектов на лунном диске. Распространение получила 10-балльная шкала, в которой наиболее темным участкам лунной поверхности (дно цирка Гримальди, темные участки в цирке Риччиоли) присвоен балл 1, самому яркому объекту, за который принимается центральная горка кратера Аристарх,—балл 10. Строго говоря, такую шкалу можно применять только в день полнолуния, поскольку при других фазах относительная яркость различных точек лунного диска сильно меняется. Исходя из некоторых общих данных относительно восприятия яркости зрением, можно было ожидать, что в отличие от шкалы звездных величин баллы глазомерной шкалы яркостей лунных объектов будут пропорциональны не логарифмам яркостей, а самим яркостям. Это было подтверждено Н. Н. Сытинской, которая сопоставила баллы шкалы с результатами современных фотометрических измерений и получила для зависимости между видимым альбедо A_v и баллом шкалы N выражение

$$A_v = 0,047 + 0,136 N.$$

Первые инструментальные наблюдения Луны были выполнены Вислиценусом в 1893—1895 гг., причем за отсутствием поверхностного фотометра яркость определялась путем наблюдения на лунном диске искусственных звезд фотометра Целльнера, блеск которых ослаблялся до исчезновения на фоне изучаемой детали, что, конечно, дает результат невысокой точности. Всего было промерено 20 деталей при различных фазах. Наблюдения были обработаны и опубликованы Виртцем в 1915 г.; сравнение полученных результатов с современными обнаруживает в общем достаточное согласие.

Менее удачной оказалась первая попытка применить к Луне фотографическую фотометрию, предпринятая Пиккерингом в 80-х годах прошлого столетия. Полученные относительные значения яркостей дают сильно преувеличенный против действительного градиент яркостей, что указывает на ошибочность шкалы.

Первыми фотометрическими наблюдениями Луны, выполненными на современном уровне техники, следует считать работы Н. П. Барабашева на Харьковской обсерватории, где они были начаты в 1917 г. Эти работы привели к установлению двух важных явлений, сущность которых сводится к нижеследующим двум положениям:

1. Во время полнолуния яркость одинаковых по характеру покрова деталей не зависит от угла падения солнечных лучей и потому одинакова во всех частях лунного диска. Это положение является фотометрическим подтверждением эффекта отсутствия потемнения к краю на лунном диске, отмеченного уже в XVII в. Другая его формулировка сводится к тому, что фактор гладкости [формула (32) § 42] для лунной поверхности равен нулю.

2. Яркость всякой детали лунного диска достигает максимума во время полнолуния.

В 1919 г. Гетцем была опубликована первая работа по абсолютной поверхностной фотометрии Луны. Был использован метод внефокальных звезд, позволивший получить отражательную способность для 55 точек лунной поверхности в фотографической системе в условиях полнолуния. В качестве звезды сравнения служила Полярная, разность величины которой по отношению к Солнцу была принята $28^m,69$. Результаты Гетца были проверены и подтверждены измерениями на визуальном фотометре, проведенными Розенбергом в 1919 г., причем снова была установлена ошибочность старых данных Пиккеринга.

В 1922 г. А. В. Марков впервые применил к лунной поверхности визуальную абсолютную фотометрию. Применялся метод стандартизации по абсолютной яркости, для чего был использован поверхностный фотометр системы С. О. Майзеля, градуированный на ламберты и установленный на экваториале обсерватории Ленинградского университета. Были получены кривые изменения яркости с фазой для ряда точек лунной поверхности. Позднее А. В. Марков применил к диску полной Луны абсолютную фотографическую фотометрию по методу внефокальных звезд.

Н. П. Барабашев и А. В. Марков опубликовали также ряд работ по теоретической интерпретации полученных ими из наблюдений результатов. Принцип расчетов состоял в том, что вещество лунной поверхности предполагалось ортотропным, а поверхность лунного шара—покрытой неровностями: возвышениями или углублениями той или иной геометрически определенной формы. Задавая направление солнечных лучей, можно было вычислить распределение яркости по поверхности таких неровностей, а также размеры и положение теней и, далее, получать среднюю яркость всей этой картины для заданного направления на наблюдателя. Ход этой яркости в зависимости от углов падения, отражения и разности азимутов может быть сравнен с тем, что получается для лунной поверхности, а это позволяет делать выводы относительно характера неровностей, покрывающих Луну.

Аналогичными расчетами занимались также В. С. Кулебакин (для земных образований) и Е. Шенберг (для Луны). Последний исследовал случай возвышений в виде кругового конуса, полушария и шарового сегмента и углублений в виде полушария и шарового сегмента. Наиболее близкие к Луне результаты дали углубления последнего типа. Впоследствии Беннетт, обрабатывая результаты своих фотовизуальных измерений яркости лунной поверхности, пришел к заключению, что всего лучше подходит модель в виде поверхности, усеянной углублениями в форме половины эллипсоида.

Неоднократно высказывалось мнение, что выводы такого рода представляют только формальный интерес, поскольку действительные неровности лунной поверхности должны быть неправильными и разнообразными как по форме, так и по размерам, так что получаемая из расчетов схема строения поверхности представляет лишь некоторую условную интерпретацию фотометрических наблюдений, быть может очень далекую от реальной картины. Как бы то ни было, полученная расчетом модель является примером степени изрытости поверхности, при которой фотометрические свойства материала оказываются одинаковыми с тем, что мы наблюдаем на Луне. По этому поводу иногда говорят, что такая модель является простейшей геометрической интерпретацией этого свойства покрова Луны, который, следуя предложению Н. С. Орловой, можно назвать термином «фотометрический рельеф».

Дальнейшие работы по фотометрии Луны, выполненные на Харьковской обсерватории, состояли в исследовании хода яркости деталей с фазой. Для этого был применен цепной метод: на каждом негативе получалось по два изображения Луны, снятых в различные дни, что позволяло сравнивать яркость в первый день с яркостью во второй, яркость во второй день с яркостью в следующий и т. д. Это дает непрерывную цепь связанных между собою наблюдений, которая, однако, не может быть замкнута в кольцо из-за невозможности вернуться к начальным условиям наблюдения и освещения.

Уже в 1931 г. были опубликованы наблюдения 31 детали, выполненные Н. П. Барабашевым по этому методу. Впоследствии В. А. Федоренко провела обширную серию измерений такого рода, включавшую 192 детали. Результаты были выражены в некоторой единой, хотя и произвольной единице яркости.

Большая работа по фотометрии Луны была опубликована В. Г. Фесенковым, Н. М. Штауде и П. П. Паренаго. Были измерены негативы, полученные П. П. Суровцевым на нормальном астрографе Ташкентской обсерватории; связь негативов осуществлена через внефокальные изображения Полярной. Измерение яркости выполнено на микрофотометре Гартмана через определенные интервалы координат без отождествления деталей; выделены только моря. Полученные значения яркостей удовлетворительно выражаются формулой

$$B = \Gamma \frac{\cos i \left(1 + \cos^2 \frac{\psi}{2} \right)}{\cos i + 0,225 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\psi}{2} \right) \cos i}, \quad (36)$$

где Γ — постоянная.

Абсолютные визуальные измерения коэффициента яркости ряда деталей лунной поверхности по методу абсолютной яркости были проведены В. В. Шароновым на обсерватории Ленинград-

ского университета в 1928 г.; работа была продолжена на Ереванской обсерватории в 1935 г., причем были испробованы различные методы стандартизации, а затем совместно с Н. Н. Сытинской в Ташкенте в 1938 г. Результатом работ явились таблицы и графики изменения r и A_v около 100 объектов в зависимости от фазы.

Большую работу по абсолютному определению A_v для большого количества объектов в различных участках спектра выполнила фотографическим путем Л. Н. Радлова. Снимки Луны были получены летом 1939 г. при помощи увеличительных камер, установленных на нормальном астрографе Ташкентской обсерватории. Стандартизация выполнена по методу отражающего экрана. Средние данные для объектов разного типа приведены в табл. 38.

Таблица 38

Сводка абсолютных определений видимого альbedo (яркостного фактора) и показателей цвета различных типов лунных образований, выполненных Астрономической обсерваторией Ленинградского университета

Тип объекта	Абсолютные значения видимого альбеда $A_B \cdot 10^3$									Показатель цвета (по Радлов-вой)		
	для наблюдае-мого полнолу-ния, визуальные (по Сытинской)			для истинного полнолуния, визуальные (по Орловой)			фотогра-фические (по Радло-вой) для значений λ			нор-мальный	УФ-ИК	
	n	крайние значения	среднее	n	крайние значения	среднее	430	560	830			
										фотогра-фический		визуаль-ный
Моря . . .	47	51—80	65	41	64—98	79	65	82	109	1,04		1,06
Болота . .	11	84—95	91	55	83—110	96	82	107	150	1,09	1,10	+0,05
Материки	24	82—125	105	20	90—152	120	97	131	177	1,15	1,12	0,08
Кратеры темные	4	60—71	65	4	76—97	84	—	—	—	—	—	—
Кратеры светлые	14	88—176	129	11	103—181	140	106	136	185	1,09	—	0,02
Светлые лу-чи . . .	7	100—163	131	4	121—162	137	117	161	204	1,14	—	0,06
Вся Луна	140	51—176	98	88	64—181	—	83	108	144	1,08	1,07	0,00

Используя ряды абсолютных определений видимого альbedo, перечисленные выше, Н. Н. Сытинская составила сводный каталог значений A_v для диска полной Луны, охватывающий 104 объекта. Из материалов этого каталога следует, что наиболее темным из исследованных объектов является один участок в Океане Бурь, для которого $A_v = 0,051$, в то время как самым светлым оказалось дно кратера Аристарх, поскольку для него $A_v = 0,176$. Таким

образом, полная градация отражательной способности на Луне соответствует отношению 1:3,45 или разности звездных величин $1^m,34$. Использовать данные каталога для различного рода статистических сопоставлений непосредственно нельзя из-за селекции объектов (большая часть измеренных деталей принадлежит морям). Поэтому при участии А. П. Борисовой были проведены дополнительные определения фотовизуальных яркостей 140 точек лунной поверхности, равномерно покрывающих весь лунный диск в шахматном порядке и тщательно привязанных к фотометрической системе каталога. Эти измерения дали среднее значение видимого альбедо 0,098. Кривая распределения точек по значениям A_v дает максимум на $A_v=0,080$.

Каталог Сытинской основан на измерениях яркости, выполненных в дни полнолуний, и не включает в себе никаких редукиций за фазовый угол. Однако данные для фактически наблюдаемых полнолуний вопроса фотометрического сопоставления лунных объектов еще не исчерпывают, поскольку фазовый угол в день полнолуния колеблется в довольно широких пределах, а экватор интенсивности может совпадать с любым диаметром лунного диска. В принципе здесь необходимо иметь данные для «истинного полнолуния», т. е. для фазового угла 0° . Но наблюдать лунный диск в такой фазе мы не можем из-за наступающего затмения Луны. Поэтому интерес представляет попытка Н. С. Орловой найти значения A_v для таких условий путем экстраполирования полученной из наблюдений кривой на $\phi=0^\circ$. Воспользоваться формулой (36), а также другими эмпирическими формулами, предложенными для представления закона отражения света от лунной поверхности, оказалось затруднительным, так как новейшим более точным и более обширным измерениям ни одна из таких формул не удовлетворяет. Поэтому экстраполяция была выполнена графическим путем. Средние значения полученных в результате этого значения A_v приводятся в табл. 38 (стр. 355), где для сравнения даны и аналогичные средние, выведенные по числам каталога Сытинской. Расчеты показывают, что вследствие крутого и неодинакового для разных объектов хода кривой яркости при малых значениях угла ϕ контрасты яркости в момент истинного полнолуния для некоторых объектов могут заметно отличаться от того, что мы видим на диске полной Луны в обычных условиях. Этим, может быть, объясняются неоднократно появлявшиеся в печати сообщения о случаях наблюдения «свечения» некоторых лунных объектов в условиях полного лунного затмения или при пепельном свете. Другая альтернатива в объяснении подобных явлений — действительная люминесценция каких-то материалов, покрывающих некоторые места на Луне.

В последних работах Н. С. Орлова, пользуясь указанными выше рядами наблюдений, проведенных в Харькове и Ленинграде,

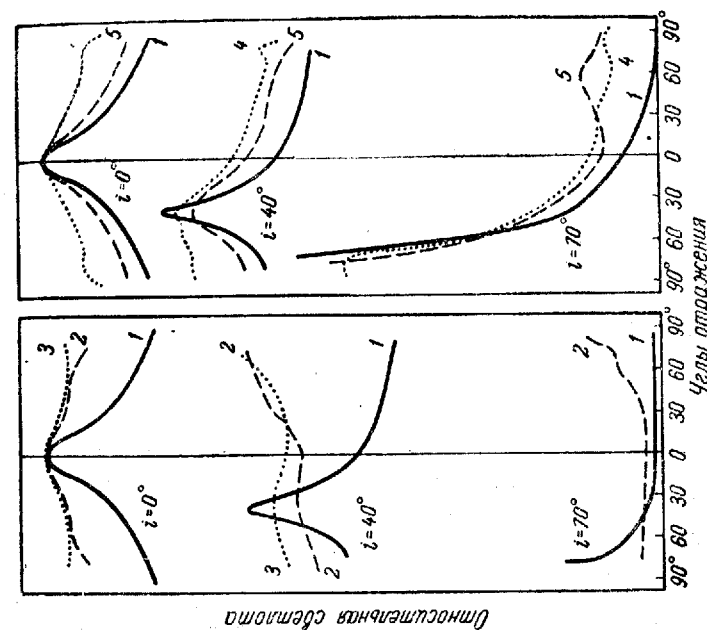


Рис. 77. Сопоставление индикаторов отражения для Луны и некоторых типов горных пород в прямоугольных координатах. 1—Луна, 2—гранит, 3—базальт, 4—туф, 5—вулканический пепел. Для горных пород кривые представляют собою средние по измерению нескольких образцов каждого названия. (По Н. С. Орловой.)

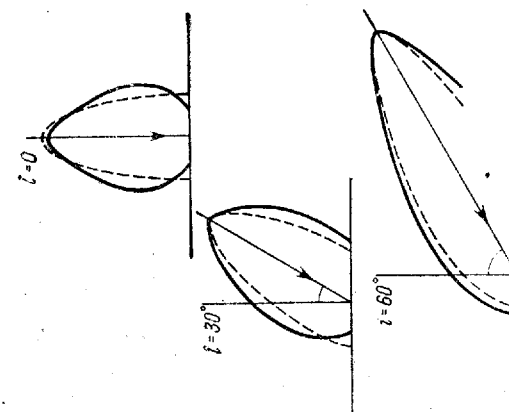


Рис. 76. Индикаторы лунной поверхности при трех значениях угла i падения солнечных лучей: сплошная линия — материя, пунктир — моря. (По Н. С. Орловой.)

получила схематические индикатрисы рассеяния для лунной поверхности. Для выполнения необходимых расчетов тут придется прибегать к гипотезе, что закон рассеяния однотипных образований во всех частях Луны одинаков. На рис. 76 (стр. 357) представлены сечения индикатрис светлоты r для некоторых значений угла падения i . Мы видим, что кривая имеет характерную для изрытых поверхностей (класса В, § 42) грушевидную форму с острым максимумом, направленным на Солнце. Для материков и для морей индикатрисы в пределах точности совпадают, что указывает на одинаковый «фотометрический рельеф», т. е. одинаковую степень изрытости. Последняя столь велика, что ни один из исследованных в лаборатории образцов, в том числе и столь ноздреватых, как пемза, туфы и вулканические шлаки, не дает индикатрисы с такой резкой заостренностью в сторону источника освещения (рис. 77 на стр. 357). Происходит ли это различие вследствие исключительного своеобразия структуры поверхностного покрова Луны или же просто от сочетания неровностей различного размера (губчатая поверхность типа туфа может образовывать сравнительно крупные холмы, гряды и т. п.), должны выяснить другие исследования. Во всяком случае сильная изрытость лунной поверхности не подлежит никакому сомнению, поскольку только ею можно объяснить результаты фотометрических наблюдений.

Фотоэлектрические наблюдения лунного диска, позволившие получить изменения яркости с фазой, а также абсолютные значения видимого альбедо, впервые были поставлены А. В. Марковым в Абастуманской обсерватории.

§ 44. Исследования лунной поверхности колориметрическим и спектрофотометрическим путем

Вопрос о спектральной отражательной способности различных деталей лунной поверхности в настоящее время освещен преимущественно колориметрическими измерениями, в то время как материал по спектрофотометрии крайне беден.

Давно отмечена удивительная особенность лунного диска, состоящая в том, что при наличии ясно видимых различий яркости различия в цвете на нем очень незначительны. На первый взгляд эти различия даже совсем незаметны, и весь лунный диск представляется окрашенным в один и тот же цвет. Лишь тщательное обозрение, выполняемое при благоприятных условиях, позволяет наблюдателю, зрение которого обладает достаточной восприимчивостью к небольшим цветовым контрастам, обнаружить ничтожные и едва заметные различия в оттенках. Так, можно убедиться, что область, примыкающая к кратеру Аристарх с северо-востока, чуть-чуть желтее окружающей равнины Океана Бурь, центральная

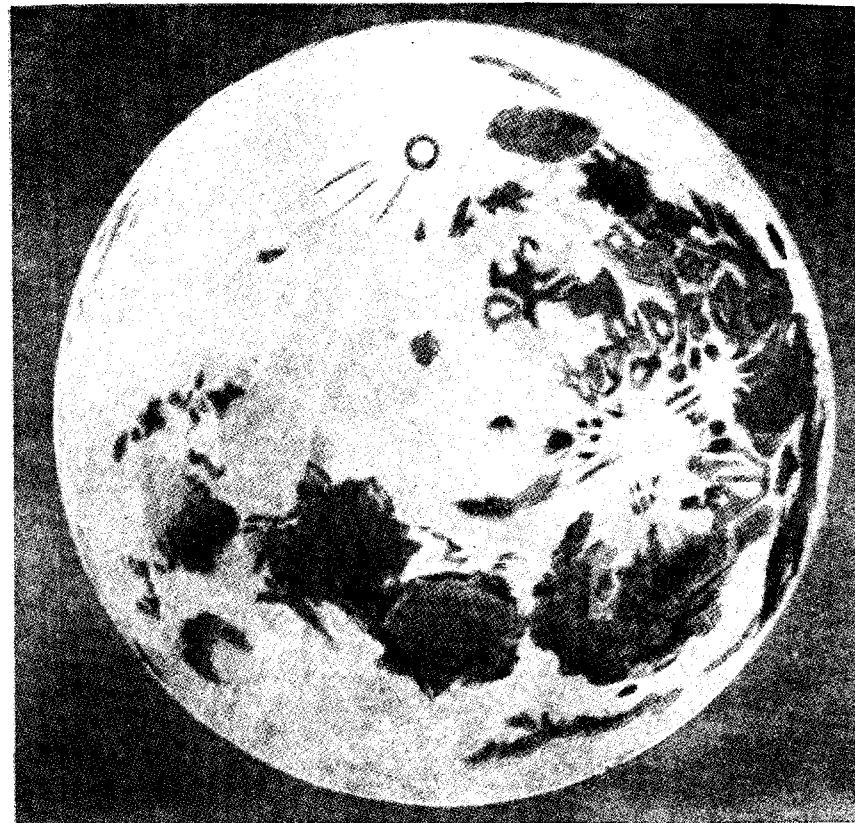


Рис. 78. Схема распределения окрашенных участков на лунном диске по фотографическим наблюдениям Мите и Зигерта. Красным цветом отмечены области с повышенным (против среднего) отражением лучей длинноволнового конца спектра, зеленым — с повышенным отражением лучей коротковолнового конца спектра.



Рис. 79. Цветная фотография Луны, полученная Н. П. Барабашовым.

часть Моря Ясности отличается от краевой зоны в сторону коричневатого цвета, некоторые коричневато-зеленоватые контрасты можно различить в Море Спокойствия и т. д. Однако при визуальном наблюдении все эти цветовые различия лежат на пределе цветовой различительной способности зрения.

Цветовые различия на лунной поверхности могут быть выявлены более отчетливо путем фотографирования в участках спектра, лежащих за пределами визуально воспринимаемого интервала длин волн, например в ультрафиолетовых и инфракрасных лучах. Этот метод был впервые применен Вудом в 1909 г. На снимках-позитивах, полученных в ультрафиолетовых лучах, некоторые объекты резко выделяются своей чернотой, что указывает на низкую отражательную способность таких участков в ультрафиолете. Наиболее яркий пример—уже упоминавшаяся область около кратера Аристарх, которая, по-видимому, вообще является наиболее окрашенным участком лунной поверхности.

Для того чтобы продемонстрировать такие различия в наиболее наглядной форме, Мите и Зигерт опубликовали двухцветную репродукцию лунного диска, на которой ультрафиолетовое и инфракрасное изображения лунного диска условно переданы видимыми цветами—зеленым и оранжевым, так что области с повышенной отражательной способностью в ультрафиолете получились зелеными, а с повышенным отражением в инфракрасном—оранжевыми (рис. 78*). В настоящее время аналогичные снимки с преувеличенным контрастом цветов можно получать пользуясь методами цветной фотографии. Прекрасные примеры таких снимков лунного диска были опубликованы Н. П. Барабашевым. На них особенно хорошо выявлена расцветка в Морях Ясности и Спокойствия, описанная выше (рис. 79).

Все эти чисто качественные данные указывают на наличие некоторых, хотя и небольших различий в ходе кривой спектральной отражательной способности для разных участков лунной поверхности. Выявить количественно эти различия могла бы спектрофотометрия.

Огромная важность исследований спектральной отражательной способности лунной поверхности была указана еще Ф. Ф. Петрушевским в его уже упоминавшемся «Плане физических исследований Луны», опубликованном в 1873 г. В этой замечательной для своей эпохи работе выдвигается мысль, что топографические исследования лунной поверхности (в то время уже весьма детальные и многочисленные) должны быть пополнены физическими исследованиями, в состав которых должны быть включены: 1) систематические измерения отражательной способности различных деталей лунной поверхности фотометрическим путем;

*) По техническим причинам у нас вместо репродукции дана ее схема.

2) исследования отражательной способности в «химически», т. е. фотографически, наблюдаемой области спектра; 3) спектрофотометрические наблюдения, позволяющие изучать ход отражательной способности по спектру, и 4) поляризационные наблюдения. Для того чтобы полученные в результате таких наблюдений материалы могли быть использованы для суждений о природе лунной поверхности, необходимо провести аналогичные измерения для различных образцов земных горных пород, выполняя их как в лаборатории, так и в полевых условиях.

Для спектрофотометрических наблюдений Луны и земных объектов Ф. Ф. Петрушевский сконструировал специальный спектрофотометр, основанный на принципе визуального сравнения двух спектров: спектра данной детали и спектра интегрального света Луны. Он вложил много энергии и труда в дело организации работы по предложенному им плану, однако осуществить задуманные мероприятия ему все же не удалось, по-видимому, вследствие неблагоприятных условий для научной работы.

Спектрофотометрические наблюдения лунной поверхности были впервые выполнены реально Вильзингом и Шейнером на Потсдамской обсерватории в 1907—1910 гг. Для измерений применялся визуальный спектрофотометр, установленный на рефракторе. Через сравнение с лампой, эталонированной по абсолютно черному телу, были выведены кривые распределения энергии в спектре излучения, отражаемого восемью избранными участками лунной поверхности. В дальнейшем ход кривых представлен в виде цветовой температуры $T_{\text{ц}}$, соответствующей значению второй постоянной формулы Планка $c_2 = 14\,600$. Результаты получены такие:

Объект	$T_{\text{ц}}$
Море дождей между Карлини и Архимедом	4400°
Материк между Макробием и Проклом	4200
Светлое пятно в северо-западной части Моря Спокойствия	4500
Темное место в Море Ясности к северу от Менелая	4600
Прокл, северная часть вала	4200
Коперник, дно	4300
Море Кризисов, темный участок	5100
Гримальди, дно	5100

Из этих данных следует, что темные участки лунной поверхности имеют более высокую цветовую температуру и, следовательно, синее. Объединяя результаты в средние по значению альбедо, получим:

	$T_{\text{ц}}$
Светлые объекты	4300°
Темные объекты	4700

При помощи того же спектрофотометра были исследованы также образцы горных пород, всего 47 названий. Для них значения $T_{\text{ц}}$ лежат между 3500 и 5900°.

Материалы этой старой работы были позднее переработаны В. В. Шароновым, который, пользуясь опубликованными теми же авторами спектрофотометрическими наблюдениями звезд, вывел кривые абсолютных значений $r(\lambda)$ для наблюдавшихся в Потсдаме лунных объектов и образцов горных пород.

К сожалению, потсдамские измерения, выполненные давно и притом методами, которые далеко уступают современным возможностям, никем не были повторены. За последнее время (1956 г.) были опубликованы лишь некоторые предварительные опыты по относительной фотометрии небольшого количества лунных деталей (В. И. Езерский и В. А. Федорец в СССР, Вигру во Франции).

В связи с проблемами спектрофотометрии Луны уместно вернуться к вопросу о люминесценции лунной поверхности, уже упоминавшемуся в предыдущем параграфе. Давно известно, что многие минералы при облучении ультрафиолетовой радиацией испускают излучение в видимой и инфракрасной частях спектра, имеющее характер флуоресценции. Естественно было предположить, что лунная поверхность, не будучи защищена атмосферой от крайнего коротковолнового излучения Солнца, может испускать излучение такого происхождения. Для того чтобы его обнаружить из наблюдений, предлагались различные пути. Так, Линк (Чехословакия), разработав фотометрическую теорию лунных затмений и сравнив результаты расчетов яркости погруженной в полутень части лунного диска с данными наблюдений, нашел некоторый избыток наблюдаемой яркости, который он приписал эффекту люминесценции под влиянием мощного ультрафиолетового излучения солнечной короны. Эти выводы были подтверждены наблюдениями лунных затмений, выполненных А. В. Марковым и Д. Е. Щеголевым в Пулкове и Фортини в Италии. Однако ценность таких заключений целиком зависит от достоверности теоретического расчета распределения света в конусах земной тени и полутени. Поскольку такой расчет всегда основывается на некоторой упрощенной схеме строения земной атмосферы (§ 51), здесь остается повод для серьезных сомнений.

Более надежным представляется метод обнаружения флуоресценции, предложенный Н. А. Козыревым в СССР и Вигру во Франции. Он основан на том, что люминесцентное излучение лунной поверхности, добавляясь к отраженному свету, должно снижать в спектре последнего глубину фраунгоферовых линий солнечного спектра. Таким образом, для открытия эффекта лунной люминесценции необходимо точное спектрофотометрическое сравнение линий в прямом солнечном и в лунном свете. Некоторые

предварительные опыты в этом направлении уже были сделаны и, по мнению наблюдателей, привели к положительным результатам. Так, Н. А. Козырев в некоторые дни наблюдал уменьшение глубины линий H и K в спектре кратера Аристарх. Реальность таких эффектов будет выяснена дальнейшими работами.

Большое количество исследований цветности лунной поверхности было выполнено путем применения различных методов колориметрии (§ 44). Результаты таких исследований, как правило, выражаются в виде значений показателей цвета C . Иногда последние дают в той же системе, которая применяется и для выражения цвета звезд, в других случаях прибегают к специальным системам показателей цвета. Напомним, что последние отличаются от нормальных двумя факторами. Во-первых, вместо нормальной фотографической и фотовизуальной фотометрических систем в них сопоставляются измерения яркости, выполненные в двух произвольных участках спектра. Ввиду того, что различия спектрального состава отраженного излучения на Луне очень незначительны, такие участки выгодно выбирать в возможно более удаленных частях спектра, например ультрафиолетовом и инфракрасном. Во-вторых, нуль-пункт звездной системы показателей цвета, определяемый распределением энергии в спектре звезд класса A0, для Луны и планет особых преимуществ не представляет и потому нередко заменяется другими. Если обозначить через B_1 и B_2 яркости некоторого объекта лунной поверхности, соответствующие участкам спектра с эффективными длинами волн λ_1 и λ_2 , причем $\lambda_2 > \lambda_1$, а через B_{01} и B_{02} — яркости в тех же участках для объекта, цвет которого принят за нуль-пункт шкалы специального показателя цвета C , то последний выражается равенством

$$C = -2,5 \lg \frac{B_2 B_{01}}{B_{02} B_1}. \quad (37)$$

В качестве излучения-стандарта, к которому отнесены яркости B_{01} и B_{02} , применяли среднюю яркость лунного диска (Л. Н. Радлова, Розенберг, Кинен), один из объектов лунной поверхности (Н. П. Барабашев, А. Т. Чекирда), абсолютно белый экран, освещенный Солнцем (Л. Н. Радлова, В. В. Шаронов). Последний вариант нуль-пункта имеет то преимущество, что он связывает полученный результат непосредственно с характеристиками отражательной способности. Именно, принимая во внимание формулу (§ 42, получаем:

$$C = -2,5 \lg \frac{A_{2B}}{A_{1B}} = D, \quad (38)$$

где A_{1B} и A_{2B} — значения видимого альбеда для соответствующих участков спектра.

Первая работа по определению показателей цвета лунных объектов путем сопоставления визуально и фотографически измеренных яркостей 55 объектов была опубликована Розенбергом. По отношению к среднему цвету лунного диска, принятому за нуль-пункт, для наиболее окрашенных областей получены значения показателя цвета $-0^m,071$ и $+0^m,086$, так что вся градация цвета составляет $0^m,16$.

В 1924 г. Н. П. Барабашев для исследования цвета 46 лунных образований применил относительную фотографическую фотометрию в трех участках спектра, вырезанных светофильтрами. Он получил довольно значительные различия цвета, соответствующие интервалу специальных C от $+0^m,31$ до $-0^m,56$, причем лунная поверхность по своим колориметрическим характеристикам оказалась близкой к темным образцам лавы, в некоторых случаях — также к глинистым и песчаным породам. Аналогичную работу позднее проделал Кинен, обработавший фотометрически снимки Луны, полученные в шести участках спектра.

В. Г. Фесенков при помощи колориметра с синим клином определил цветовую температуру ряда участков лунных морей и получил значения в пределах от 4410 до 4720°.

Обстоятельная работа по колориметрии Луны проделана Л. Н. Радловой, которая в 1938 г. на Ташкентской обсерватории при помощи синего клина астрофотометра Розенберга определила показатели цвета, спектральные классы и цветовые температуры для 35 точек лунной поверхности. Дисперсия цветов оказалась небольшой, а именно, показатели цвета заключаются в пределах от $+0^m,95$ до $+1^m,16$, спектральные классы от G1 до G3, цветовые температуры от 5220 до 5550°. Намечается увеличение дисперсии с повышением яркости объектов. Продолжением этой работы явилась уже упоминавшаяся выше абсолютная фотографическая фотометрия в четырех участках спектра, проведенная также в Ташкенте в 1939 г. В условиях полнолуния определялись значения A_B для разных участков спектра. Для измеренных 99 объектов нормальные показатели цвета заключаются в пределах от $+0^m,88$ до $+1^m,55$, что подтверждает выводы предыдущей работы, в то время как специальные показатели цвета, соответствующие ультрафиолетовому и инфракрасному участку спектра, дают наибольшее различие на $0^m,68$. Средние значения C по группам объектов приведены в табл. 38 (см. стр. 355).

В противоположность этому А. В. Марков из своих фотоэлектрических наблюдений в разных участках спектра получил значительную дисперсию цветовых характеристик, поскольку у него наблюдаемые значения спектрального класса заключены в пределах от F9 до K2, что даже превосходит дисперсию, найденную Барабашевым (F9—K0). Заметим, что Г. А. Тихов в 1923 г. опубликовал результаты фотометрических наблюдений, из которых для

цветовой температуры различных участков Луны получены значения от 4000 до 3000°, чему соответствуют спектральные классы K2—M0. Последнее значение соответствует цвету Марса и потому реальным считаться не может.

В 1954 г. Н. П. Барабашев и А. Т. Чекирда опубликовали новую работу по относительной фотометрии лунных объектов, выполненной в пяти участках спектра. Результаты представлены в форме специальных показателей цвета (авторы работы называют их «относительными яркостями»), вычисленных в смысле: звездная величина в данном участке спектра минус звездная величина в зеленых лучах ($\lambda=502 \text{ м}\mu$), и отнесенных к одному из объектов (участок № 33, Океан Бурь) как к нуль-пункту. Всего измерено 72 объекта. Крайние различия для системы: синие лучи (415 $\text{м}\mu$) минус зеленые лучи, составляют $0^m,345$, для наиболее раздвинутых участков спектра — ультрафиолетового (365 $\text{м}\mu$) и инфракрасного (840 $\text{м}\mu$) — $0^m,651$, что несколько больше того, что нашла Л. Н. Радлова, но много меньше цветовых различий, получившихся в предыдущих работах. Средние значения специальных показателей цвета по отдельным группам объектов оказались такими (табл. 39):

Таблица 39

Тип объекта \ Участок спектра, $\text{м}\mu$	840	650	502	415	365
Кратеры лучевых систем	+0,078	-0,043	0,000	+0,147	+0,051
Горные области	+0,002	+0,023	0,000	+0,114	+0,080
Моря	+0,009	-0,016	0,000	+0,059	+0,041
Неправильно очерченные моря	+0,004	+0,017	0,000	+0,060	+0,056
Дно кратеров	+0,008	-0,017	0,000	-0,029	-0,100
Светлые лучи	+0,083	+0,072	0,000	+0,189	+0,111
Светлое кольцо Тихо	+0,057	-0,057	0,000	+0,105	+0,038

Подводя итоги всему сказанному, мы приходим к заключению, что по вопросу о величине цветовых различий на Луне в настоящее время существуют две точки зрения. Согласно одной из них, поддерживаемой Н. П. Барабашевым, А. Т. Чекирдой и А. В. Марковым, различия в показателях цвета, получаемые из фотометрических измерений, выполненных в разных участках спектра, реальны, и потому дисперсия цвета на лунной поверхности довольно значительна. Одноцветность лунного диска для зрения в этом случае

должна получить специальное объяснение, пока еще не найденное. Вторая точка зрения, на которой стоят Л. Н. Радлова, Н. Н. Сытинская и В. В. Шаронов, сводится к тому, что большие различия в показателях цвета, получаемые фотометрией со светофильтрами, нереальны и отражают значительные погрешности измерений, возникающие, в частности, из-за того, что отождествление измеряемых в различных спектральных интервалах участков лунной поверхности выполняется неточно. В этом случае различия в альбедо находят свое отражение в результатах как фиктивные различия в цвете.

Доводом в пользу фиктивности больших цветовых различий явилась работа Л. Н. Радловой, которая сопоставила попарно все перечисленные выше каталоги показателей цвета для Луны. Если значения S реальны, то между данными двух каталогов должна существовать тесная корреляция. Такая корреляция не была обнаружена ни для одной комбинации каталогов, что дало Л. Н. Радловой повод утверждать, что полученные из наблюдений различия цветности представляют собой лишь случайные погрешности измерительного процесса, полностью маскирующие реальные различия в окраске, поскольку последние значительно меньше погрешностей.

В качестве довода в пользу крайней незначительности контрастов цвета на Луне Л. Н. Радлова и В. В. Шаронов выдвигают также результаты следующих опытов. На фоне лунных материков, рассматриваемых в поле зрения телескопа, устанавливалось поле сравнения астрофотометра Розенберга, которому при помощи синего клина придавалась различная, но наблюдателю не известная окраска. Наблюдатель должен был сообщать, отличается ли и если да, то в какую сторону (красноватую или синеватую), цвет поля от цвета данного участка лунного диска. Оказалось, что при различии показателя цвета в системе Кинга более чем на $0^m,1$ разница в цвете видна сразу и резко бросается в глаза. При различии в $0^m,01$ разница в окраске зрением совсем не воспринимается. В интервале разностей показателя цвета от $0^m,01$ до $0^m,1$ различие в цвете воспринимается, но с тем или иным усилием.

Если сопоставить эти результаты с тем, что видно на Луне, то можно утверждать, что на всей лунной поверхности нет ни одного объекта, для которого различие в показателе цвета с фоном было бы $0^m,1$ или больше. Для большей части объектов отличие в цвете совсем незаметно, из чего следует, что различие в показателе цвета для них меньше $0^m,01$. В тех случаях, где различие в цвете все же замечается (например, средняя часть Моря Ясности и его края, «цветная область Вуда» около кратера Аристарх и окружающая равнина Океана Бурь и др.), различие в показателях цвета должно составлять несколько сотых звездной величины.

§ 45. Поляриметрия и ее приложения к исследованию поляризации на лунном диске

Как известно, лучистый поток, рассеиваемый матовой поверхностью, частично поляризован. Это означает, что яркость B такой поверхности можно представить как сумму двух компонентов: яркости B_0 , даваемой естественным светом, и яркости B_{Π} , образованной линейно поляризованным светом. Явление поляризации, сопровождающее рассеяние света, может быть охарактеризовано, во-первых, положением плоскости поляризации компонента B_{Π} и, во-вторых, степенью поляризации p , выражаемой равенством

$$p = \frac{B_{\Pi}}{B_0 + B_{\Pi}}. \quad (39)$$

Нахождение подобных характеристик и составляет задачу поляриметрии рассеянного излучения.

Для сильно окрашенных материалов поляризация p , а иногда и плоскость последней меняются с длиной волны λ . В таких случаях исследование поляризации надо вести в монохроматическом излучении, что составляет предмет *спектрополяриметрии*. Однако для обычных материалов, и в частности для поверхности Луны и планет (может быть, за исключением Марса), ввиду их слабой окрашенности можно ограничиваться измерениями поляризации в широких участках спектра, например визуальном или фотографическом.

Явление поляризации излучения, испускаемого некоторой поверхностью, обнаруживается путем наблюдения этой поверхности сквозь оптическое приспособление, пропускающее только электромагнитные колебания, происходящие в одной фиксированной плоскости. Такое приспособление принято называть *анализатором*, а связанную с ним плоскость пропускаемых колебаний — *плоскостью поляризации анализатора*. Призмы, изготовленные из кристаллов кальцита по схеме, предложенной Николем, Глезбурком и другими оптиками, а также поляроиды разных типов являются общеизвестными примерами анализаторов.

Напомним, что коэффициент пропускания T анализатора для естественного света не зависит от ориентировки плоскости его поляризации, в то время как для линейно поляризованного света он определяется углом α , составленным плоскостями поляризации прибора и излучения, что количественно выражается законом Малюса:

$$T_{\Pi} = \tau \cos^2 \alpha. \quad (40)$$

Поэтому если рассматривать испускающую частично поляризованный свет поверхность через анализатор и вращать последний вокруг его оптической оси, то яркость поверхности будет меняться от

$\tau(B_0 + B_{\Pi})$ до τB_0 , что и будет служить указанием на наличие поляризации.

Если задача наблюдений ограничивается тем, чтобы обнаружить лишь существование поляризации, а измерения величины ее не требуется, то целесообразно воспользоваться *полярископом*. В этом приборе при наличии даже незначительной поляризации появляются системы темных и светлых интерференционных полос. Не останавливаясь на устройстве аппаратов этого типа, описанных во всех курсах физики, отметим, что некоторые из них, как, например, полярископ Савара, позволяет обнаруживать поляризацию уже в 1%. Еще большей чувствительностью обладает полярископ, предложенный В. В. Каврайским.

Для количественного исследования поляризации используют описанное выше изменение яркости, наблюдаемой через поляризационную призму. Соответствующая установка должна состоять из анализатора, поворачиваемого на нужный и точно отсчитываемый угол α , и фотометра, позволяющего измерять яркость B , наблюдаемую сквозь анализатор. Фотометр должен быть устроен так, чтобы явление поляризации не оказывало на его показания никакого влияния, а источник излучения, освещающий исследуемый образец, должен давать естественный свет.

Назовем главной плоскостью установки положение плоскости поляризации анализатора при отсчете 0 на имеющемся при нем разделенном круге. Пусть плоскость поляризации излучения образца, положение которой нам неизвестно, составляет с этой плоскостью двугранный угол β . Выполним измерение яркости образца B при трех положениях анализатора, характеризуемых углами поворота α_1 , α_2 и α_3 . Это даст нам систему трех тригонометрических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= \tau [B_0 + B_{\Pi} \cos^2 (\alpha_1 - \beta)], \\ B_2 &= \tau [B_0 + B_{\Pi} \cos^2 (\alpha_2 - \beta)], \\ B_3 &= \tau [B_0 + B_{\Pi} \cos^2 (\alpha_3 - \beta)], \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

решение которой и позволяет найти неизвестные β , B_0 , B_{Π} и затем степень поляризации p . Предложены различные схемы измерений и расчетов для получения такого результата. В частности, если положить:

$$\alpha_2 = \alpha_1 + 60^\circ; \quad \alpha_3 = \alpha_1 + 120^\circ,$$

то решение приводит к нижеследующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} p &= 2 \frac{\sqrt{(B_1 - B_2) B_1 + (B_2 - B_3) B_2 + (B_3 - B_1) B_3}}{B_1 + B_2 + B_3}, \\ \operatorname{tg} 2\beta &= \sqrt{3} \frac{B_2 - B_3}{2B_1 - B_2 - B_3}. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Этим методом широко пользуются на практике для исследования поляризации света небесных тел и земных образцов, однако он дает удовлетворительные результаты только при высокой точности измерений, поскольку разности яркостей, входящих в формулы (42), при малой поляризации малы. Фотографическая и даже визуальная фотометрия здесь не дает достаточной точности, и потому необходимо пользоваться фотоэлектрическими установками.

Высокую точность определения p обеспечивают специальные визуальные приборы, называемые *фотополяриметрами*. Широко распространены приборы этого рода, основанные на применении поляризаторов с двойным лучепреломлением. Такой поляризатор дает два изображения рассматриваемого объекта, поляризованные во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Поэтому если их рассматривать через вращаемый анализатор, то яркость одного изображения меняется пропорционально $\cos^2 \alpha$, а другого как $\sin^2 \alpha$. Если свет естественный, то равенство яркостей наступает при $\alpha = 45^\circ$. Наличие поляризации, вообще говоря, изменяет этот угол.

Пусть плоскость поляризации призмы двойного изображения составляет с плоскостью поляризации измеряемого излучения угол β . Тогда яркости двух изображений, обусловленные поляризованной компонентой отраженного света, будут $\tau B_n \cos^2 \beta$ и $\tau B_n \sin^2 \beta$, в то время как яркости, образованные естественным светом, будут одинаковы и равны $\frac{1}{2} \tau B_0$. При рассматривании через анализатор видимые яркости двух полей будут:

$$\left. \begin{aligned} B'_1 &= \tau \left[\frac{1}{2} B_0 + B_n \cos^2 \beta \right] \cos^2 \alpha, \\ B'_2 &= \tau \left[\frac{1}{2} B_0 + B_n \sin^2 \beta \right] \sin^2 \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Измерение состоит в том, что установка анализатора делается на такой угол α , при котором $B'_1 = B'_2$, что дает:

$$\left(\frac{1}{2} B_0 + B_n \cos^2 \beta \right) \cos^2 \alpha = \left(\frac{1}{2} B_0 + B_n \sin^2 \beta \right) \sin^2 \alpha. \quad (44)$$

Легко видеть, что при $\beta = 45^\circ$ это равенство осуществляется при $\alpha = 45^\circ$, что позволяет легко находить угол β . Для этого ставят анализатор на отсчет $\alpha = 45^\circ$ и вращают весь прибор вокруг его оси до уравнивания яркостей. В этом положении и делают отсчет некоторого угла φ по дополнительному кругу с градусными делениями, указывающими поворот прибора в целом. Значению $\beta = 0$ соответствует положение прибора на отсчете $\varphi = 45^\circ$. На этот отсчет и ставят прибор для последующего опре-

деления степени поляризации p . При $\beta = 0$ равенство (44) принимает вид:

$$\left(\frac{1}{2} B_0 + B_n \right) \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} B_0 \sin^2 \alpha, \quad (45)$$

откуда легко получаем:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} \frac{B_0}{B_0 + B_n} \quad (46)$$

и, далее,

$$p = 1 - 2 \cos^2 \alpha = -\cos 2\alpha. \quad (47)$$

Для выполнения таких измерений еще в XIX в. Корню построил фотополяриметр, в котором поляризатором служит призма Волластона, а анализатором — призма Николя. Сравниваются яркости двух соприкасающихся изображений квадратной диафрагмы, заполненной светом изучаемого образца. При таком устройстве граница между сравниваемыми полями остается видимой и при равенстве яркостей, что неблагоприятно отражается на точности измерений, которая с таким прибором составляет 1—2%. В этом отношении более совершенным считается аналогично устроенный фотополяриметр Мартенса, в котором для получения двух соприкасающихся полей использована бипризма Френеля. С этим прибором величину p можно мерить с точностью до 0,5—1%.

Еще большую точность дают визуальные поляриметры, основанные на принципе полярископа. Примером может служить астрономический поляриметр Лию, схема которого представлена на рис. 80 (стр. 370). Перед глазной линзой окуляра O вставлен полярископ $П$. Две одинаковые пластинки из исландского шпата толщиной 1,4 мм каждая выточены параллельно естественной плоскости спайности. Они сложены так, чтобы их оси были взаимно-перпендикулярны, что вполне аналогично такому же устройству в полярископе Савара. Однако в последнем в качестве анализатора используется николь или другая призма одиночного изображения, а у Лию вместо этого применена призма двойного изображения, составленная из кальцитовых и стеклянных призм. Это дает ряд преимуществ, к числу которых прежде всего относится высокая светосила (через двулучепреломляющую призму проходит почти весь свет, а через николь — меньше половины). Далее, каждое из изображений, даваемых двулучепреломляющей призмой, имеет свою систему полос, причем их расположение взаимно дополнительно. Угол раздвоения выбран так, чтобы полосы двух изображений совмещались соответственно: темная с темной, светлая со светлой. Это увеличивает контраст и, следовательно, повышает видимость полос при слабой поляризации. Полосы получаются резкими и тонкими. Последнее важно при изучении объектов малого углового размера.

Окуляр O укреплен на конце трубки A , непосредственно соединенной с окулярным концом телескопа B . Трубка A может поворачиваться вокруг оптической оси последнего; углы поворота отсчитываются по разделенному кругу K . Внутри трубки A помещено кольцо L_1 , на котором натянута очень тонкая (0,01 мм) целлулоидная пленка. Кольцо может поворачиваться вокруг оси DE ; углы поворота отсчитываются на секторе C посредством индекса H .

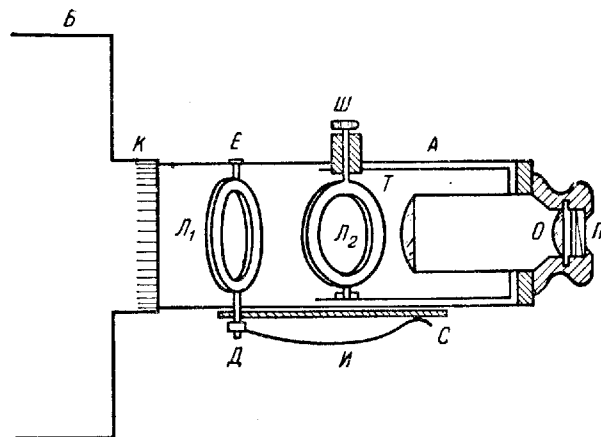


Рис. 80. Схема визуального поляриметра Лию.

Внутри трубки находится вторая труба T , которая может независимо поворачиваться вокруг оптической оси. Она несет в себе второе кольцо L_2 , также затянутое целлулоидной пленкой. Поворот трубки T и изменение наклона плоскости L_2 осуществляются посредством выведенного через прорезь в трубке A штпфта $Ш$.

Принцип действия прибора основан на том, что к естественной небольшой поляризации изучаемого объекта при помощи наклоняемой пластинки L_1 добавляется некоторая искусственная поляризация, вследствие чего полосы, благодаря слабости контраста находившиеся за пределом различимости, становятся видимыми. Если наблюдаемый свет естественный, то эти полосы при вращении трубки T вокруг оптической оси менять интенсивность не будут. При наличии же даже очень незначительной поляризации вращение трубки T будет вызывать усиление и ослабление полос, что и является признаком наличия поляризации. Последняя компенсируется наклоном пластинки L_2 .

Техника наблюдений состоит в том, что, приведя изображение планеты или нужного участка лунной поверхности в центр поля зрения, наклоном L_1 вызывают появление слабых полос и убеждаются, что при быстрых поворотах трубки T они меняют контраст-

ность. Ищут тот поворот трубки A , при котором эти изменения прекращаются, что наступает тогда, когда плоскости поляризации прибора и объекта составляют угол 45° . Повернув после этого трубку A на 45° , устанавливают ось пластинки L_1 перпендикулярно к плоскости поляризации объекта—положение, в котором повороты T дают максимальное колебание интенсивности полос. Затем наклоняют плоскость пластинки L_2 до тех пор, пока эти колебания не исчезнут. Соответствующий отсчет по сектору C позволяет по градуировочному графику находить долю поляризованного света p .

Лию утверждает, что его прибор позволяет обнаруживать и даже измерять степень поляризации до 1 промилле ($0,001 = 1\text{‰}$) включительно, что, по-видимому, несколько преувеличено.

Поляриметрические исследования планет пока немногочисленны и сводятся преимущественно к измерению поляризации интегрального света. Больше материала мы имеем по вопросу о поляризации света, отраженного различными участками поверхности Луны.

Первые наблюдения поляризации лунного диска были выполнены в 1811 г. французским ученым Араго, который приписал обнаруженную им заметную поляризацию рассеянному свету в атмосфере, будто бы окружающей лунный шар. Это ошибочное мнение было опровергнуто в 1859 г. Секки, который показал, что поляризация должна быть результатом отражения от твердого материала лунной поверхности.

В 1877 г. Росс наблюдал поляризацию для Моря Кризисов при разных фазах. Он нашел, что поляризация достигает максимального значения 12% около квадратур, в то время как в полнолуние она обращается в нуль.

В 1889—1890 гг. Ландерер опубликовал результаты измерений, выполненных при помощи фотополяриметра Корню, установленного на небольшом телескопе. Его установка не позволяла выделять отдельные детали лунной поверхности, и потому он измерял среднюю поляризацию для центральной части видимого серпа. Максимум поляризации получился для угла поляризации *) $33^\circ 17'$, чему соответствует фазовый угол $\phi = 113^\circ 5'$, причем поляризация около первой четверти доходит до 20,7%, а около последней до 32,9%. Это различие Ландерер объяснил тем, что после полнолуния моря, для которых поляризация сильнее, занимают на освещенной части лунного диска большую площадь. Замечая, что для экватора интенсивности «угол поляризации» равен допол-

*) Под углом поляризации многие авторы понимают угол, равный $90^\circ - \frac{\phi}{2}$, где ϕ — топоцентрический фазовый угол для данной точки лунной поверхности. Под названием «угол рассеяния» или «угол зрения» обычно понимают сам угол ϕ .

нению угла падения i до 90° , и применяя к максимуму поляризации закон Брюстера, согласно которому тангенс угла падения, при котором поляризация зеркально отраженного луча является полной, равен показателю преломления, можно получить, что показатель преломления для вещества лунной поверхности должен быть порядка 1,57—1,53. Однако такой расчет предполагает зеркально отражающую, а не рассеивающую поверхность. Поэтому для сопоставления были исследованы также различные горные породы. Многие из исследованных магматических пород имеют угол максимальной поляризации, близкий к полученному для Луны; в частности, это относится к диориту, диабазу, андезиту, кварцевым порфирам, обсидиану. Всего ближе подошел витрофир, для которого угол максимальной поляризации найден равным $33^\circ 10'$.

Методика Ландерера была значительно усовершенствована Н. П. Барабашевым на Харьковской обсерватории. Пользуясь также фотополяриметром Корню, он смог, однако, измерять поляризацию для участков лунной поверхности размером в $4'$. Изучались большие однородные участки лунной поверхности, объекты, лежащие по экватору интенсивности, и области, для которых угол падения равен углу отражения. Автор отмечает, что кривая поляризации идет очень плавно, максимум ее выражен неясно, и потому точное определение соответствующего ему угла невозможно. В разных случаях получалось значение угла максимальной поляризации от 34 до 37° . Максимальные значения поляризации для морей доходят до 47%, для материков—до 17%. Исследованы также некоторые земные образцы.

Большие ряды наблюдений поляризации лунной поверхности за последнее время были получены Лио при помощи описанного выше усовершенствованного поляриметра. Найденные им результаты сводятся к следующему:

1. Плоскость поляризации в первом приближении не зависит ни от угла падения солнечных лучей, ни от угла отражения в сторону наблюдателя. Она одинакова во всех точках лунного диска и при всех фазах определяется только положением экватора интенсивности, которому она либо параллельна (что принято называть *положительной поляризацией*), либо перпендикулярна (что составляет *отрицательную поляризацию*). В частности, для морей и материков плоскость поляризации совпадает.

2. Максимум положительной поляризации для всех участков лунного диска наблюдается около значений $\phi = \pm 90^\circ$, т. е. около первой и последней четверти. В это время величина поляризации различных деталей поверхности неодинакова, причем ясно выступает обратная зависимость со светлотой: чем светлее деталь, тем ниже ее поляризация в максимуме. Так, для светлого материала внутренней яркой кратеров максимальная поляризация составляет менее 50‰, для нормально окрашенных участков материков

65—75‰, для морей 120—160‰. Области, для которых поляризация в максимуме лежит между 75 и 120‰, на лунной поверхности мало распространены. Моря и другие области с темной окраской характерны разнообразием поляризации, которая от точки к точке меняется сильно; напротив, материк в смысле значений поляризации в максимуме сравнительно однородны.

3. Одинаково окрашенные образования показывают примерно одинаковую поляризацию во всех частях диска, из чего следует отсутствие зависимости между величиной поляризации и значе-

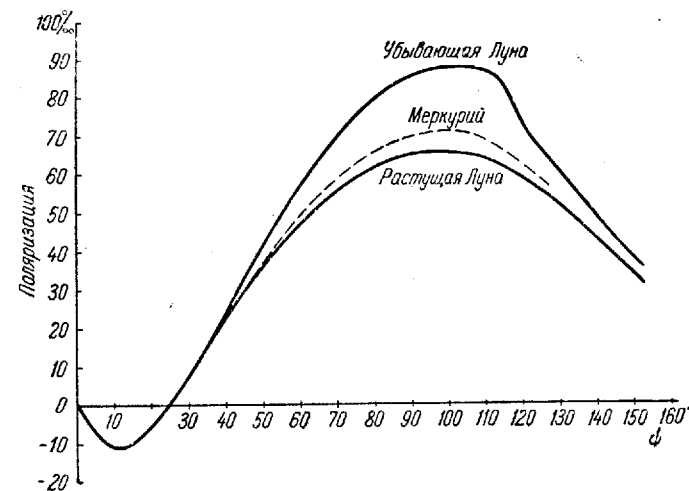


Рис. 81. Изменение поляризации интегрального света Луны и Меркурия с фазой. (По Лио.)

ниями углов падения и отражения. Исключение составляет лишь зона диска, непосредственно примыкающая к терминатору, где поляризация несколько повышена, особенно на морях.

4. С увеличением фазового угла за 110° поляризация снижается, вместе с тем уменьшаются и различия в ее величине для различных деталей диска. Наблюдения удалось довести только до $\phi = 160^\circ$, где поляризация еще достигает 30‰, обнаруживая тенденцию к дальнейшему быстрому уменьшению. Ее ход вблизи $\phi = 180^\circ$ остается пока неизученным.

5. При уменьшении угла ϕ и приближении фазы к полнолунию поляризация также быстро снижается и для всех деталей диска обращается в нуль при одинаковом для всех объектов значении $\phi = 23^\circ$. При меньших ϕ наблюдается инверсия поляризации: последняя снова становится заметной, но теперь ее плоскость перпендикулярна к экватору интенсивности. Она одинакова для всех объектов лунного диска и становится наиболее резкой при

$\phi = 11^\circ$, когда эта отрицательная поляризация дает минимум, составляющий $9-12\%$. При дальнейшем уменьшении ϕ поляризация снова приближается к нулю и, поскольку можно судить по наблюдениям, выполненным во время лунных затмений, исчезает при $\phi = 0^\circ$.

Поскольку величина и положение плоскости поляризации не зависят от положения объекта на лунном диске, все явления, описанные выше, наблюдаются и для интегрального света Луны. Соответствующие кривые приведены на рис. 81 (стр. 373). Различие между кривыми для прибывающей и убывающей Луны происходит от неодинаковой доли площади, занятой морями. Благодаря этой причине максимум поляризации около последней четверти, наступающий при $\phi = 105^\circ$, составляет 88% , в то время как около первой четверти поляризация доходит только до 66% , что случается при $\phi = 100^\circ$. При обоих направлениях изменения фазы точка инверсии ($p=0$) лежит при $\phi = 23^\circ 30'$, и минимальная поляризация составляет -12% при $\phi = 11^\circ$.

Отметим значительное разногласие по поводу величины поляризации между полученными Лию данными и результатами прежних определений: в то время как у Лию поляризация даже для морей не превосходит 17% , у Ландерера она доходит до 33% , у Барашева даже до 47% .

Лию исследовал поляризацию также для большого количества образцов горных пород. Оказалось, что сходства между последними и лунной поверхностью в этом отношении не получается. Именно, кривые поляризации земных образцов отличаются от того, что мы привели выше для Луны, в нижеследующем:

- 1) у них угол инверсии меньше;
- 2) минимум достигается при меньших значениях ϕ , максимум — при больших;
- 3) отрицательная поляризация меньше, положительная — больше.

Исключения составляют вулканические пеплы, для которых наблюдаются те же соотношения между светлотой и характеристиками поляризации, что и для Луны. Так, с увеличением альбедо от $0,051$ до $0,48$ угол инверсии возрастает с 18 до 23° , положение минимума поляризации перемещается с 8 до 10° , а величина поляризации в минимуме с -16 до -9% , в то время как величина поляризации в максимуме соответствует соответственно в пределах от 340 до 40% . Смешивая черный пепел с его разными разновидностями, удалось получить смесь со средней светлотой $0,13$, которая давала поляризационную кривую, очень похожую на ту, что мы приводили для Луны.

Максимальная степень поляризации $p_{\text{макс}}$, полученная Лию для некоторых лунных образований, была сопоставлена Н. Н. Сытинской с абсолютными значениями видимого альбедо A_v тех же

объектов в полнолуние. Зависимость получилась линейной:

$$p_{\text{макс}} = 0,276 - 1,95A_v.$$

Эта формула выражает в применении к покрову Луны общее правило, установленное на земных материалах еще в первом десятилетии текущего века русским физиком Н. А. Умовым, состоящее в том, что поляризация света, отражаемого рассеивающим материалом, меняется обратно светлоте последнего.

Обширную серию поляризметрических наблюдений выполнил В. П. Джапашвили на Абастуманской обсерватории на 33-см рефлекторе. Применялся фотоэлектрический фотометр в сочетании с поляридом, позволявший вырезать на лунном диске участок в $12',3$. Лунные детали общим числом 41 наблюдались при различных фазовых углах. Максимум поляризации для 16 деталей точно соответствует $\phi = 90^\circ$, для остальных он смещен на несколько градусов, причем для объектов западной половины диска в сторону меньших ϕ , а для объектов восточной половины в сторону больших ϕ . Средние значения поляризации в максимуме, включая фиктивную поляризацию, добавляемую отражениями в инструменте и составляющую около 4% , таковы:

	$p_{\text{макс}}, \%$
Моря и заливы	18,3
Кратеры	13,2
Материи и светлые области	11,0
Светлые лучи	13,9

Интересен вопрос о причинах инверсии поляризации при малых ϕ . Единственное объяснение, предложенное в настоящее время шведским ученым Эманом, состоит в том, что тут сказывается эффект светового обмена между неровностями лунной поверхности, т. е. повторных отражений луча плоскостями, по-разному наклоненными по отношению к солнечным лучам, линии зрения наблюдателя и друг к другу.

§ 46. Применение исследований отражательной способности к изучению природы поверхности Луны

Конечной задачей фотометрических исследований диска некоторого светила является получение материалов о возможном составе его поверхности. Однако яркость в некоторой точке диска, вообще говоря, складывается из яркости света, отраженного от поверхности, и яркости света, рассеянного в атмосфере. Поэтому анализ результатов фотометрических, а также колориметрических и поляризметрических измерений тел солнечной системы должен включать

в себя разделение слагаемых, зависящих от твердой поверхности тела и от его атмосферы. Такое разделение компонентов основывается на данных по оптике планетных атмосфер, которая будет нами разобрана в следующей главе. Дело значительно упрощается, когда вместо двух компонентов яркости—поверхностного и атмосферного—имеется в наличии только одна. Это мы будем иметь, в частности, в случае небесного тела, совсем лишенного атмосферной оболочки. Очевидно, что для такого тела полученные из наблюдений данные непосредственно характеризуют оптические свойства твердой поверхности. С практической точки зрения к этому случаю относится только один небесный объект—Луна, поскольку диски остальных лишенных атмосферы планет и спутников слишком малы по угловым размерам и потому пока предметом приложения методов поверхностной фотометрии не были.

Наиболее важные результаты фотометрии и колориметрии лунной поверхности сводятся к нижеследующему:

1. На поверхности Луны существуют различия в яркости, соответствующие колебаниям отражательной способности (видимого альbedo) от 0,05 до 0,2. В то же время различия в цвете очень незначительны, так что характерной особенностью лунной поверхности является ее одноцветность: окрашенность всех деталей примерно в один и тот же коричневато-серый цвет.

2. Между отражательной способностью и строением поверхности существует определенная зависимость, состоящая в том, что гладкие низменности (моря, дно многих цирков) являются темными, гористые области—светлыми, а некоторые молодые кратеры—особо светлыми.

3. Анализ изменения яркости с направлением падающего и отражаемого лучей приводит к выводу, что поверхность Луны всюду сильно изрыта, как бы вскопана, причем степень этой изрытости одинакова для морей и материков, но повышена для наиболее светлых образований.

Как мы указывали в предыдущих параграфах, интерпретация как этих, так и других результатов фотометрических наблюдений Луны основана на принципе аналогии с Землей: считая, что условия образования коры на Земле и на Луне были сходны, естественно предположить, что одинаковые по петрографическому составу горные породы будут иметь на этих светилах и одинаковую окраску. Таким образом, задача состоит в том, чтобы путем сравнения Луны и земных образцов отобрать те виды горных пород, которые по своей отражательной способности обнаруживают с лунной поверхностью достаточное сходство. Очевидно, что присутствие таких пород на Луне будет достаточно вероятно.

В очень многих работах по фотометрии и колориметрии Луны приводятся результаты подобных исследований горных пород и делаются некоторые выводы о том, какие из них можно считать

подходящими к Луне. Так, Вильзинг и Шейнер на основании своих спектрофотометрических исследований Луны и горных пород нашли, что лунные моря могут состоять из обсидиана и темных разновидностей лавы, а материки—из кварцевых порфиров и гранитов. Вуд, снимавший Луну в различных участках спектра, утверждал, что в окрестностях кратера Аристарх находятся сера или содержащие ее породы. Харгрэвс на основании применения цветной фотографии нашел сходство лунной поверхности с пылью и продуктами выветривания. Н. П. Барабашев путем анализа фотометрических наблюдений, выполненных в отдельных участках спектра, вырезанных светофильтрами, пришел к заключению, что моря по цвету похожи на вулканические лавы, а материки—на глины и песчаники, в то время как Л. Н. Радлова на основании чисто колориметрических измерений нашла сходство между Луной и некоторыми образцами аплита, серы и сиенита. В дальнейшем по поводу суждений такого рода были высказаны следующие критические замечания:

1. Фотометрический метод исследования петрографического состава лунной поверхности основан на гипотезе, согласно которой видимая нами поверхность Луны представляет собою неизмененную свежую и чистую поверхность горных пород наружного слоя лунной коры. Гипотеза эта представляется не очень правдоподобной, поскольку трудно допустить, чтобы за все время существования Луны на ней не образовалось никакого поверхностного покрова из продуктов позднейшего изменения коренных горных пород или из принесенного извне материала.

2. Суждения, основанные на сопоставлении небесного тела и земных образцов по какому-нибудь одному оптическому признаку, например только по абсолютному значению альbedo для какого-нибудь участка спектра или только по цветовым характеристикам, мало достоверны. Для повышения достоверности выводов надлежит применять параллельное сопоставление по возможно большему числу характеристик, как, например, по светлоте, цвету и поляризации. При этом необходимо учитывать, что многие оптические и термические признаки отражают не столько химический или минералогический состав материала, сколько его фактуру, т. е. геометрическую структуру внешней поверхности. Так, форма индикатрисы рассеяния выражает степень гладкости или изрытости поверхности, теплопроводность тесно связана с пористостью и т. д.

3. Сопоставление лунной поверхности с отдельными произвольно отобранными образцами земных горных пород методически неправильно, поскольку окраска является очень изменчивым свойством как минералов, так и образуемых последними горных пород. Благодаря этому для горной породы любого наименования можно подобрать отдельный образец, достаточно близкий по отражательной способности и цвету к тому или иному образова-

нию на Луне. Правда, тут существуют некоторые правила и закономерности, которые сводятся к следующему. Минералы лейкократовые (светлые), будучи лишены идиохроматической, т. е. присущей данному химическому соединению, собственной окраски, в отдельных чистых образцах бесцветны, а в больших скоплениях имеют белый цвет, но ничтожное количество посторонних примесей может придавать им аллохроматическую, т. е. постороннюю, извне внесенную окраску в любой цвет, до черного включительно. Это мы наблюдаем на примере таких распространенных породообразующих минералов, как кварц, полевые шпаты, мусковит, кальцит, каолинит. Напротив, минералы меланократовые, т. е. обладающие очень темной идиохроматической собственной окраской, сохраняют свой темный цвет и в присутствии посторонних примесей, что мы видим на примере таких соединений, как пироксены, амфиболы, магнетит, биотит. Поэтому высокое альbedo может рассматриваться как указание в пользу отсутствия меланократовых соединений, в то время как низкое альbedo доказательством отсутствия лейкократовых соединений служить не может.

Таким образом, невысокое альbedo Луны для суждений о составе лунной поверхности само по себе дает мало материала, и потому тут необходимо обратиться к данным статистических подсчетов. Общеизвестно, что при всем разнообразии окраски каждый вид горной породы имеет некоторый характерный для него, наиболее часто встречающийся цвет. Если бы на земном шаре отсутствовали почва и кора выветривания, так что поверхность суши представляла бы собою поверхность обнаженных коренных горных пород, то обширные участки последних, наблюдаемые с достаточно большого расстояния, казались бы однородными по цвету и яркости, причем их видимая окраска соответствовала бы именно этому среднему, наиболее часто представленному цвету. Правда, получить оптические параметры, определяющие последний, на практике далеко не просто.

Принципиально можно принять за идеал такую схему. Представим себе, что во всех частях земного шара, где залегает горная порода данного названия, сняты все вышележащие слои горных пород, так что изучаемая порода обнажена. Измеряем ее яркость и цвет в точках, расположенных в шахматном порядке на равном расстоянии друг от друга по обеим координатам. Построенные по такому материалу кривые распределения будут более всего соответствовать тому, что дают наблюдения Луны, и поэтому окажутся наиболее пригодны для сопоставления.

На практике приходится пользоваться образцами горных пород, собранными в музеях или коллекциях. Это ведет к появлению различных источников селекции, из которых важнейшими можно считать нижеследующие три: 1) получение образцов либо из естественных обнажений, либо из различных горных разработок при

полном их отсутствии для остальных частей земной поверхности, где данная порода скрыта вышележащими отложениями; 2) преимущественное получение образцов из географически ограниченного района и их отсутствие для удаленных материков; 3) проявляющееся при составлении коллекций стремление к разнообразию и широкому охвату всевозможных вариантов, включая самые редкие. Последнее для интересующей нас задачи особенно опасно, так как может повести к полному искажению как кривой распределения, так и различных средних характеристик отражательной способности. Достаточно сравнить пестроту витрин минералогических музеев с однообразием горных осыпей, чтобы убедиться, к сколь серьезным последствиям для нашей задачи может повести подобная тенденция, так что тут нужна большая осторожность. Во всяком случае бесспорно, что для сопоставления с Луной, на которой мы всегда наблюдаем только осредненную отражательную способность сравнительно обширных участков, необходимо применять именно средние значения оптических характеристик горных пород, полученных путем изучения большого количества надлежащим образом отобранных образцов, а не одиночных произвольно взятых экземпляров.

Первые работы по сопоставлению лунной поверхности с осредненными данными для большого числа образцов пород разных наименований были опубликованы в 1953 г., причем Н. А. Будникова выполнила сопоставления по цвету, а А. П. Борисова — по светлоте. Затем В. В. Шаронов сопоставил кривые распределения образцов горных пород, метеоритов и деталей лунной поверхности как по цвету, так и по светлоте. Позднее Н. Н. Сытинская указала на недостаточную надежность такой методики и предложила строить статистические диаграммы по светлоте и цвету одновременно. Примеры таких диаграмм приводятся на рис. 82 (стр. 380). По оси абсцисс отложены значения светлоты r , по оси ординат — показателя желтизны D .

Общий итог всех перечисленных выше работ сводится к тому, что ни один из видов горных пород нельзя признать похожим на лунную поверхность по светлоте и цвету одновременно. На диаграмме «светлота—цвет» точки лунных объектов занимают очень ограниченную область, что наглядно иллюстрирует исключительно малую дисперсию не только цвета (что бросается в глаза с первого взгляда), но и яркости. В то же время эта область почти полностью избегается точками как земных образцов, так и метеоритов. Это значит, что если бы на Земле последовательно обнажали горизонты, занятые породами различных типов, и наблюдали из мирового пространства яркость и цвет, то ни для одного названия горной породы мы не получили бы того сочетания последних, которое свойственно лунной поверхности. Можно сказать, что последняя обладает специфическими особенностями отражательной способ-

ности, которые отличают ее от всех видов земных горных пород и которые сводятся к следующему: 1) незначительная дисперсия

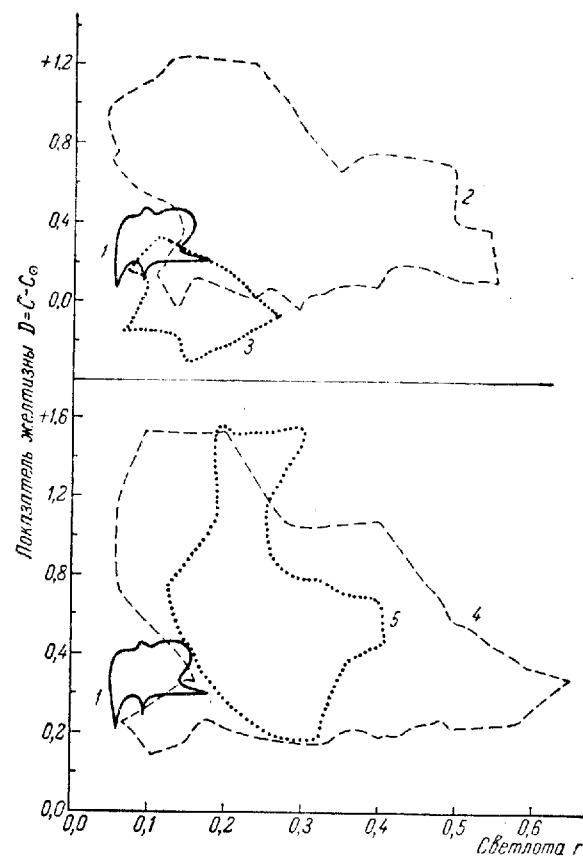


Рис. 82. Примеры диаграмм светлота—цвет. На оригинальных диаграммах наносятся точки, соответствующие отдельным объектам лунной поверхности и отдельным образцам горных пород. Здесь в целях разгрузки и наглядности чертежа вместо этого даны контуры участков, занятых точками, относящимися к данному типу объектов, полученные путем соединения краевых точек. 1—объекты лунной поверхности, 2—кислые магматические горные породы (граниты), 3—основные и ультраосновные магматические породы (базальт и др.), 4—известняки и мергели, 5—песчаники и конгломераты.

как по цвету, так и по светлоте; 2) очень низкая отражательная способность, по малости значений светлоты уступающая только

коре плавления метеоритов; 3) значительная окрашенность в сторону красно-желтых тонов, по средним параметрам уступающая только окрашенности песчаников и гранитов.

Проблема особенностей окраски лунной поверхности обсуждается в селенографической литературе уже давно. Было выдвинуто немало предположений, объясняющих присущую Луне малую дисперсию яркости и цвета. Представляется целесообразным рассмотреть эти гипотезы в свете полученных за последнее время новых материалов.

1. Гипотеза особого петрографического состава лунной поверхности предполагает, что горные породы на Луне представлены иными, чем на Земле, сочетаниями минералов или даже состоят из минеральных видов, у нас совсем неизвестных, чем и объясняется их специфическая окраска. Возможность этого нельзя оспаривать безусловно, но все же признать такие обстоятельства вероятными трудно, так как условия возникновения коры Луны и Земли должны были быть сходными, а потому предположение об образовании на Луне огромного количества минералов, отсутствующих на Земле, требует дополнительных гипотез для его обоснования.

2. Гипотеза особой окраски лунных пород состоит в том, что петрографический состав самих пород лунной поверхности принимается сходным с тем, что мы наблюдаем на Земле или в метеоритах, но окраска этих пород предполагается иной. Такое предположение представляется более вероятным, чем предыдущее, поскольку цвет является очень изменчивым свойством минералов и может варьировать под влиянием самых незначительных причин. Необходимо заметить, что можно получить некоторое согласие с данными наблюдений, если, например, принять, что лунная поверхность всюду сложена только из темно-розовых разновидностей гранита. Однако такое однообразие петрографического характера не кажется достаточно правдоподобным.

3. Гипотеза последующего изменения окраски поверхностной пленки под влиянием космических факторов. Так, было указано, что космические лучи, проникая внутрь вещества, вызывают там разрушение атомных ядер, сильную ионизацию и перестройку кристаллической решетки, что должно вести к значительным изменениям окраски. Однако, принимая такую гипотезу, необходимо еще доказать, что эти изменения будут действовать в направлении возникновения именно тех цветовых особенностей, которые мы наблюдаем на Луне.

4. Гипотеза осреднения. Минимальный размер объекта, видимого на Луне в современные телескопы, может быть оценен порядка 1 км, а всякого рода фотометрические и колориметрические измерения относятся к участкам, по меньшей мере

в 10 раз большим. Поэтому, получаемые из наблюдений характеристики отражательной способности представляют собою средние данные для больших площадей. Если предположить, что различные окрашенные участки всегда имеют достаточно малые размеры и что различные варианты окраски всюду встречаются одинаково часто, то мы во всех местах будем наблюдать примерно одинаковый средний цвет. Однако такое объяснение представляется крайне искусственным. Кроме того, против него говорит то, что с переходом к объектам меньших размеров дисперсия цвета не увеличивается, а также то, что, несмотря на огромное количество визуальных наблюдений, на Луне не было обнаружено ни одного маленького пятна с резко выраженной окраской. Наконец, рассматриваемая гипотеза несостоятельна еще и потому, что никакое сочетание земных горных пород не приведет к средней отражательной способности, аналогичной той, что наблюдается на Луне, в частности потому, что Луна в среднем темнее всех земных пород.

5. Гипотеза метеорной пыли. Неоднократно высказывалось мнение, что лунная поверхность всюду должна быть покрыта слоем материала метеорного происхождения. Действительно, подсчеты показывают, что, если бы вся поступающая на Луну метеорная материя оставалась на ней и равномерно распределялась по поверхности, то это за 10^9 лет дало бы сплошной слой в несколько сантиметров толщины. Однако такой покров должен был бы всюду иметь одинаковую отражательную способность, а если последняя и показывала бы какие-либо случайные различия, то они были бы с морфологией лунной поверхности не связаны. Поскольку на Луне мы видим заметные различия в яркости и при том тесно связанные со строением поверхности, необходимо допустить, что отражательная способность полностью или хотя бы частично определяется составом горных пород. Это заставило Л. Н. Радлову выдвинуть специальный вариант гипотезы, согласно которому пылевой покров является полупрозрачным или не сомкнутым, так что сквозь него как бы просвечивает подстилающая поверхность, различия яркости и цвета которой пылевым покровом хотя и сглажены, но полностью не скрыты.

6. Гипотеза коры выветривания. Неоднократно высказывалось предположение, что в прошлом на Луне могла быть атмосфера, содержащая достаточное количество водяного пара, кислорода, озона или других газов, способных химически воздействовать на поверхностный слой горных пород, в то время как текущая вода могла бы оказывать и физическое действие. Это должно было привести к тому, что наблюдаемая нами окраска лунной поверхности определяется продуктами выветривания коренных горных пород. Сюда же можно отнести защищавшееся многими авторами предположение, что лунные моря в далеком прошлом были бассейнами, действительно наполненными водой, и что

их современная темная окраска имеет причиной осаждение из воды каких-то разновидностей ила. Все это на первый взгляд как будто согласуется с тем, что мы имеем на Земле, где продукты выветривания изменяют и сглаживают окраску горных пород. Однако пески, глины и другие горные породы, из которых состоит кора выветривания на нашей планете, своей светлой и разнообразной окраской резко отличаются от отражательной способности Луны.

7. Гипотеза вулканического пепла. Сторонники существования на Луне активного вулканизма в настоящее время указывают на вулканические пеплы как на материал, способный изменять видимую окраску ландшафта. Такое объяснение особенностей окраски Луны соблазнительно тем, что среди пеплов часто встречаются образцы с темной окраской и еще тем, что только пепел оказался похожим на покров Луны с поляриметрической точки зрения. Несмотря на это, согласиться с тем, что лунная поверхность везде и всюду покрыта свежими продуктами вулканических извержений, трудно, так как это требует, чтобы на Луне везде были вулканы и чтобы на морях они давали пепел иной окраски, чем на материках.

8. Метеорно-шлаковая гипотеза. Н. Н. Сытинская за последнее время разрабатывала и защищала теорию, согласно которой видимая лунная поверхность везде покрыта слоем вещества, образовавшегося из коренных горных пород под влиянием взрывных явлений, сопровождающих удары метеорных тел разного размера о лунную поверхность. Живая сила движения метеорита при таком ударе переходит в ряд других форм энергии, в частности в тепло. Количество тепловой энергии оказывается значительно больше того, что расходуется на превращение в пар самого метеорита, а потому разрушению, а частично и испарению подвергается и вещество самой лунной поверхности. По расчетам К. П. Станюковича и В. В. Федынского масса превращенного в пар лунного вещества может в тысячи раз превосходить массу самого метеорита. Высокая температура, связанная с этим процессом, будет сопровождаться различными химическими реакциями, в частности диссипацией молекул силикатов горных пород. Оседая обратно, выброшенный взрывом материал будет покрывать поверхность Луны продуктами, окраска которых отличается от цвета коренных горных пород, чем и можно объяснить цветовые особенности лунной поверхности. Вместе с тем эта окраска в какой-то мере должна зависеть от химического и минералогического состава исходной горной породы. Если считать, что переработанное взрывом вещество в основном оседает вблизи точки падения метеорита, то это должно вести к тому, что отражательная способность покрова в разных местах лунной поверхности будет различной, что и дает возможность объяснить зависимость между

светлотой и морфологическим типом данного участка лунного ландшафта. Представляется вероятным, что получившийся таким путем покров представляет собою не пыль, а спекшуюся губчатую ноздреватую массу типа вулканического шлака.

Пример коры плавления метеоритов показывает, что под действием высокой температуры из горной породы выделяются черные окислы железа. Известно также, что, сплавляясь в пламени дуги, метеориты и горные породы обычно дают королек черного цвета. Если представить себе, что в условиях взрывных явлений на Луне происходит диссипация железосодержащих силикатов типа оливина и фаялита с образованием окислов FeO , Fe_3O_4 и Fe_2O_3 и что, кроме того, в наличии оказывается некоторое количество воды (например, за счет выделений лунных пород, ледяных метеоритов или солнечных корпускул), приводящее к образованию гидроокисей железа, то можно получить объяснение той характерной коричневатой-черной окраски, которая свойственна всем без исключения образованиям на Луне.

Такая точка зрения представляется нам весьма правдоподобной, ибо она основана на явлениях, несомненно происходящих на Луне в действительности, поскольку метеорные тела разного размера на единицу площади поверхности Луны поступают в том же количестве, что и на Земле. Однако едва ли окраска поверхности лунных пейзажей определяется только одним каким-либо фактором. Скорее следует ожидать, что она возникла под действием весьма многих природных явлений, к числу которых относятся также и падения метеоритов. Во всяком случае шлако- или туфообразная, т. е. сильно пористая, ноздревато-губчатая структура наружного покрова на Луне подтверждается данными, полученными из анализа температурных изменений лунной поверхности на протяжении лунации, что будет нами описано подробнее в гл. IX.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ VII

§ 39

- Барабашев Н. П., О роли изучения физических условий на Луне и планетах в космогонии, Труды Харьковской обсерв. 3 (11), 5—11, 1954.
Петрушевский Ф. Ф., План физического исследования поверхности Луны, Журн. русск. химич. и физич. о-ва 5, № 5, 219—238, 1873.
Шаронов В. В., Проблемы абсолютной фотометрии тел солнечной системы, Учен. зап. Ленингр. ун-та 53, 5—36, 1940.

§§ 40 и 41

- Барабашев Н. П. и Семейкин Б., Влияние температуры на характеристическую кривую фотографической пластинки, Astron. Nachr. 236, 353, 1929.

- Краммер О. П. и Курганов В., Определение коэффициента отражения стандартных экранов, Астрон. журн. 14, 224—227, 1937.
Марков А. В., Новый визуальный микрофотометр, Астрон. журн. 20, 51—52, 1943.
Никонов Б. В., Об учете атмосферной экстинкции при электроколориметрических наблюдениях, Докл. АН СССР 45, 151—154, 1944.
Пархоменко П. И., Формулы для учета эффекта ореола, Астрон. журн. 10, 394—399, 1933.
Радлова Л. Н., Исследование отражательной способности гипсового экрана, Журн. техн. физики 13, 223—229, 1943.
Свечникова Г. П. и Свечников М. А., О влиянии фотографической иррадиации на видимый диаметр и краевую яркость изображения планетного диска, Науч. бюлл. Ленингр. ун-та 33, 8—12, 1955.
Сытинская Н. Н., Абсолютное определение яркости фотографическими методами, Учен. зап. Ленингр. ун-та 82, 163—200, 1941.
Сытинская Н. Н., Измерение яркости в фотографических дневных стильбах, Журн. техн. физики 11, 694—696, 1942.
Сытинская Н. Н., Об учете атмосферного поглощения при абсолютной фотометрии небесных тел, Астрон. журн. 21, 230—241, 1944.
Сытинская Н. Н., Абсолютная фотометрия протяженных небесных объектов, Изд. Ленингр. ун-та, 1948.
Сытинская Н. Н., Исследования по методике абсолютной фотометрии небесных объектов, Учен. зап. Ленингр. ун-та 116, 138—157, 1948.
Сытинская Н. Н., К вопросу об аккумулятивном эффекте в фотографической фотометрии, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 22, 5—6, 1949.
Фесенков В. Г., Астрофотометр для измерения яркости поверхностей, Астрон. журн. 2, № 2, 31—36, 1925.
Фесенков В. Г., Влияние дифракции света на распространение яркости на планетных дисках, Астрон. журн. 2, № 2, 17—20, 1925.
Фесенков В. Г., Штауде Н. М., Виноградова Б. и Баранцева М., Редукция фотометрических наблюдений над Луной за эффект ореола, Астрон. журн. 3, № 2, 75—91, 1926.
Фесенков В. Г., К вопросу о стандартизации фотопластинок, Астрон. журн. 13, 117—121, 1936.
Фесенков В. Г., К методике фотографической астрофотометрии, Астрон. журн. 15, 248—256, 1938.
Шаронов В. В., Об определении абсолютной отражательной способности поверхностей Луны и планет, Труды обсерв. Ленингр. ун-та 6, 26—35, 1936.
Шаронов В. В., Абсолютные методы измерения коэффициента яркости образцового экрана, Астрон. журн. 18, № 2, 121—124, 1941.
Шаронов В. В., Фотографическая иррадиация и ее влияние на снимки планетных дисков, Астрон. журн. 27, № 2, 116—122, 1950.
Dollfus A., Photomètre a franges pour mesurer les differentes régions d'un objet observé dans une lunette, CR Acad. Paris 243, 1833—1835, 1956.
Dollfus A., Photomètre a double image pour comparer les taches de la surface d'une planete, CR Acad. Paris 243, 2023—2025, 1956.

§ 42

- Былов М. В., Об отражении света от естественных поверхностей, Труды Ленингр. отд. ин-та геодезии и картографии 4, 1932.
Григорьев П. В., Опыт сравнения отражательной способности льда и полярной шапки планеты Марс, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 18, 6—7, 1947.
Калитин Н. Н., Методика измерения альbedo земной поверхности, Изв. Главн. геофизич. обсерв., № 4, 1930; № 3—4, 26—30, 1931.

- Калитин Н. Н., Спектральное альbedo снежного покрова, Изв. АН СССР, 153—164, 1938.
- Козлова К. И., Сравнение отражательных свойств морей Марса со спектральной отражательной способностью некоторых земных растений, Вестн. АН Казахск. ССР 4, 84—89, 1953.
- Кринов Е. Л., Спектральная отражательная способность некоторых земных образований, Сб. «Исследования отражательной способности», 29—52, 1934.
- Кринов Е. Л., Спектрофотометрическое изучение 40 каменных метеоритов, Астрон. журн. 17, № 4, 40—67, 1940.
- Кринов Е. Л., Спектральная отражательная способность природных образований, Изд. АН СССР, 1947.
- Кулебакин В. С., Об отражении света от земных покровов, Труды Гос. эксперим. электротехн. ин-та 17, 5.
- Орлова Н. С., Определение коэффициентов яркости природных покровов в естественных условиях при различных углах падения и отражения, Изв. АН Казахск. ССР 90, 141—156, 1950.
- Орлова Н. С., Новая модель универсального клинового фотометра, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 28, 3—6, 1951.
- Орлова Н. С., Индикатрисы рассеяния некоторых материалов, Учен. зап. Ленингр. ун-та 153, 166—193, 1952.
- Орлова Н. С., О методе подобия при индикатометрических измерениях, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 32, 3—4, 1954.
- Остяков П. М. и Козлова К. И., Спектральная отражательная способность субарктических растений, Изв. АН Казахск. ССР 90, 157—164, 1950.
- Пущейко Е. К., Спектральное и фактурное изучение фонов, Оптика в военном деле, 3-е изд., т. I, 287—292, 1945.
- Сытинская Н. Н. и Шаронов В. В., Опыт аэрофотометрического определения коэффициентов рассеяния земной поверхности по методу одновременных измерений яркости и освещенности, Журн. геофизики 4, № 1, 40—45, 1934.
- Сытинская Н. Н., Новая характеристика природных покровов—фактор гладкости, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 6, 6—8, 1946.
- Сытинская Н. Н., Определение степени гладкости поверхности планет фотометрическими методами, Учен. зап. Ленингр. ун-та 116, 123—137, 1948.
- Сытинская Н. Н., Исследование светлоты и цвета каменных метеоритов, Астрон. цирк. № 136, 22, 1952.
- Тихов Г. А., Цветовые свойства зелени, Труды Ленингр. отд. ин-та геодезии и картографии 4, 1932.
- Тихов Г. А., Новые исследования рассеивания визуальных и инфракрасных лучей земными образованиями, Труды Ленингр. отд. ин-та геодезии и картографии 13, 12—15, 1932.
- Тихов Г. А., О спектральных коэффициентах рассеяния, Сборник работ по аэрофотометрии, № 1, 113—126, 1934.
- Тихов Г. А., Спектральная отражательная способность растений в связи с вопросом о растительности на Марсе, Вестн. АН Казахск. ССР 9, № 4(13), 3—6.
- Тихов Г. А., Спектральный анализ растений, Докл. АН СССР 57, № 7, 673—676, 1947; Изв. АН Казахск. ССР, сер. астрон. и физ., 3, 109—112, 1948; Природа, № 6, 3—7, 1949.
- Тихов Г. А., Профиль главной полосы поглощения хлорофилла, Докл. АН СССР 65, № 5, 657—659, 1949.
- Тихов Г. А., Флуоресценция растений в инфракрасных лучах, Докл. АН СССР, № 5, 627—628, 1948; Вестн. АН Казахск. ССР, № 11, 35—41, 1948.

- Тихов Г. А., Спектр самоизлучения (флуоресценции) растений в красных и инфракрасных лучах, Докл. АН СССР 70, 1, 109—112, 1950.
- Тихомиров В. С., Спектральная отражательная способность реликтовых растений, Изв. АН Казахск. ССР 90, 165—169, 1950.
- Тихомиров В. С., Об амплитуде сезонных изменений некоторых спектральных отражательных свойств растений, Труды сектора аэроботаники I, 37—41, 1953.
- Шаронов В. В., Рассеяние света земными образованиями и аэрофотометрические методы его исследования, Сб. «Исследование отражательной способности», 3—28, 1934.
- Шаронов В. В., Отражательная способность некоторых природных образований, Сб. «Исследование отражательной способности», 53—59, 1934.
- Шаронов В. В., Фотометрические наблюдения со стратостата и их задачи, Труды Конфер. по изучению стратосферы, 211—215, 1935.
- Шаронов В. В., Универсальный клиновой фотометр, Учен. зап. Ленингр. ун-та 31, 72—81, 1939.
- Шаронов В. В., Проблемы оптики ландшафта, Вестн. Ленингр. ун-та 5, 3—28, 1949.
- Angström A., The albedo of various surfaces of ground, Geografiska Annal. 4, 1925.
- Hulburt E., The ultraviolet, visible and infrared reflectivities of snow, sand and other substances, Journ. Optic. Soc. Amer. 17, 23—25, 1928.
- Kimball H. and Hand I., Reflectivity of different kinds of surfaces, Monthly Weather Rev. 57, № 7, 1929; 58, № 7, 1930.
- Luckiesh M., Aerial photometry, Astrophys. Journ. 49, 108—130, 1919.
- Richardson L., The reflectivity of woodland, fields and suburbs, Meteorol. Soc. Quart. Journ. 56, 233, 1930; Observatory 52, № 667, 1929; Union Geodes et Geophys., III assembl. 1927, Cambridge, 1928.

§§ 43 и 44

- Барабашев Н. П., Спектрофотометрическое исследование покрова — Луны, Астрон. журн. 1, № 3—4, 44—57, 1924.
- Барабашев Н. П., Фотографическая фотометрия 31 области Луны, Публ. Харьковск. обсерв. 1, 35—54, 1927.
- Барабашев Н. П. и Чекирда А. Т., Об отражении света от поверхности Луны и Марса, Астрон. журн. 22, № 1, 11—22, 1945; Бюлл. Харьковск. обсерв. 5, 3—12, 1944.
- Барабашев Н. П., О цветных контрастах на поверхности Луны, Цирк. Харьковск. обсерв. № 12, 3—6, 1953.
- Барабашев Н. П. и Чекирда А. Т., О цветных контрастах лунной поверхности, Труды Харьковск. обсерв. 11, 13—25, 1954.
- Барабашев Н. П. и Чекирда А. Т., О цвете светлых лучей кратеров Тихо, Коперника и Кеплера, Цирк. Харьковск. обсерв. № 13, 3—13, 1955.
- Езерский В. И. и Федоренко В., Опыт фотографической спектрофотометрии лунной поверхности, Астрон. цирк. № 159, 18—20, 1955.
- Езерский В. И. и Федоренко В., К вопросу о цветовых контрастах лунной поверхности, Цирк. Харьковск. обсерв. № 15, 17—20, 1956.
- Козырев Н. А., Люминесценция лунной поверхности и интенсивность корпускулярного излучения Солнца, Изв. Крымской астрофиз. обсерв. 16, 148—158, 1956.
- Марков А. В., Фотометрические наблюдения деталей лунной поверхности, Изв. Русск. астрон. о-ва 25, № 1—4, 91—106, 1923.
- Марков А. В. и Барабашев Н. П., Об отражении света от лунной поверхности, Русск. астрон. журн. 3, № 1, 55—60, 1926.

- Марков А. В., Фотографическая яркость и отражательная способность деталей лунной поверхности, Русск. астрон. журн. 4, № 1, 68—87, 1927.
- Марков А. В., Распределение яркости по диску Луны в полнолуние, Астрон. журн. 25, № 3, 172—179, 1948.
- Марков А. В., Цвет Луны и Земли, Изв. АН Казахск. ССР 90, 92—96, 1950.
- Марков А. В., Отражательная способность и показатели цвета Земли и деталей Луны по электрофотометрическим промерам, Бюлл. Абастуманской обсерв. 11, 107—142, 1950.
- Орлова Н. С., О сражении фотометрических наблюдений Луны с формулами отражательной способности и между собой, Паучн. бюлл. Ленингр. ун-та 31, 3—4, 1953.
- Орлова Н. С., Опыт составления каталога отражательной способности лунных образований при истинном полнолунии, Вестн. Ленингр. ун-та 9, № 2, 77—86, 1954.
- Орлова Н. С., Индикатрисы рассеяния для лунной поверхности, Астрон. цирку. № 156, 19—21, 1955.
- Радлова Л. Н., Визуальная колориметрия Луны, Учен. зап. Ленингр. ун-та 82, 99—129, 1941.
- Радлова Л. Н., Фотографическая колориметрия Луны, Астрон. журн. 20, № 5—6, 1—13, 1943.
- Сытинская Н. Н. и Шаронов В. В., Исследование отражательной способности лунной поверхности, Учен. зап. Ленингр. ун-та 153, 114—154, 1952.
- Сытинская Н. Н., Сводный каталог абсолютных значений визуальной отражательной способности 104 лунных объектов, Астрон. журн. 30, № 3, 295—301, 1953.
- Сытинская Н. Н., Зависимость между баллами визуальной шкалы яркости лунных объектов и абсолютными значениями яркостного фактора, Астрон. цирку. № 144, 11—12, 1953.
- Тихов Г. А., Цвет Земли и Луны, Русск. астрон. календарь 27, 136—141, 1924.
- Тюрк Г. Г., Визуальная фотометрия Луны, Мирозведение 12, № 1, 1930.
- Федорен В. А., Фотографическая фотометрия лунной поверхности, Труды Харьковск. обсерв. 2, 49—172, 1952.
- Фесенков В. Г., Фотометрические исследования лунной поверхности, Астрон. журн. 5, № 4, 219—235, 1928.
- Фесенков В. Г., Штауде Н. М. и Паренато П. П., Фотометрия Луны, Труды Главн. астрофизич. обсерв. 4, № 1, 1—90, 1928.
- Фесенков В. Г. и Паренато П. П., Некоторые фотометрические исследования Луны, Астрон. журн. 6, № 3—4, 279—284, 1929.
- Шаронов В. В., Опыт абсолютного измерения яркости точек лунной поверхности, Труды I, II, и III астрон. съездов, 158, 1930.
- Шаронов В. В., Опыт измерения абсолютных значений коэффициента яркости лунной поверхности, Учен. зап. Ленингр. ун-та 31, 28—60, 1939.
- Veinett A., A photovisual investigation of the brightness of 59 area on the Moon, Astrophys. Journ. 88, 1—26, 1938.
- Goetz P., Photographische Photometrie der Mondoberfläche, Veröff. Sternw. Oesterberg 1, 2, 1919.
- Graff K., Zur photographischen Photometrie der Vollmondformationen, Mitt. Sternw. Wien 4, 6, 79—86, 1949.
- Örik E., Photometric measures on the Moon and earth-shine, Publ. Obs. Tartu 24, 1, 1924.
- Rosenberg H., Photometrische Messungen der Mondoberfläche, Astron. Nachr. 214, 137—146, 1921.
- Wirtz C., Wislicenus Selenophotometrische Beobachtungen, Astron. Nachr. 201, 289—332, 1915.

- Keenan P., The measurement of lunar color differences, Publ. Astron. Soc. Pacific 43, 203—214, 1931.
- Miethe A. und Seegert B., Über qualitative Verschiedenheiten des von den einzelnen Teilen der Mondoberfläche reflektierten Licht, Astron. Nachr. 188, 9—12; 239—246; 371—374, 1911.
- Vigroux E., Comparaison spectrophotométrique de la lumière diffusée par quelques points de la Lune, Journ. des observ. 39, 134—136, 1956.
- Wilsing J. und Scheiner J., Vergleichende spektralphotometrische Beobachtungen am Monde und an Gesteinen, Publ. Obs. Potsdam 20, 61, 1—68, 1909; 24, 77, 1921.
- Wood R., The Moon in ultra-violet light and spectro-selenography, Popul. Astr. 18, 67—72, 1910; Monthly Not. Roy. Astr. Soc. 70, 226, 1910; Astrophys. Journ. 36, 75—84, 1912.

§ 45

- Барабашев Н. П., Поляриметрические наблюдения лунной поверхности и горных пород, Astron. Nachr. 229, № 1, 7—14, 1927.
- Джанияшли В. П., Электрополяриметрия лунной поверхности, Астрон. цирку. № 167, 16—19, 1956.
- Липский Ю. Н., Метод Умова и его применение к исследованию планет, Сообщ. Астрон. ин-та им. Штернберга, № 96, 25—35, 1954.
- Липский Ю. Н., Поляризационно-спектрофотометрический метод исследования света, рассеянного матовыми поверхностями, Вестн. Моск. ун-та, № 9, 41—44, 1954.
- Сытинская Н. Н., Зависимость между поляризацией и альбедо для объектов лунной поверхности, Астрон. цирку. № 168, 18, 1956.
- Фесенков В. Г. и Крамер О. П., О поляризации света, отраженного лунной поверхностью, Докл. АН СССР 40, № 4, 152—154, 1943.
- Landeger J., Sur l'angle de polarisation de la Lune, CR Acad. Paris 109, 360—362, 1889; 110, 210—212, 1890; 160, 1164—1165, 1910.
- Lyot B., Etude des surfaces planétaires par la polarisation, CR Acad. Paris 177, 1015, 1923; 178, 1796, 1924.
- Lyot B., Recherches sur la polarisation de la lumière des planètes et de quelques substances terrestres, Annals obs. Paris, Sec. Medon, t. 8, f. 1, 56—62; 147—150, 1929.
- Ohman G., A tentative explanation of the negative polarization in diffuse reflection, Annals Obs. Stockholm 18, 8, 1955.

§ 46

- Барабашев Н. П. и Чекирда А. Т., Сравнение цвета и коэффициентов яркости участков лунной поверхности с некоторыми земными горными породами, Астрон. журн. 33, № 4, 549—555, 1956; Цирк. Харьковск. обсерв. № 15, 9—15, 1956.
- Борисова А. П., Опыт статистического сравнения отражательной способности земных горных пород и лунных объектов, Вестн. Ленингр. ун-та 8, № 8, 89—95, 1953.
- Будников Н. А., Опыт статистического сравнения цвета земных горных пород и лунных объектов, Вестн. Ленингр. ун-та 8, № 8, 84—87, 1953.
- Орлова Н. С., Фотометрический рельеф лунной поверхности, Астрон. журн. 33, № 1, 93—100, 1956.
- Орлова Н. С., Сравнение закона отражения света для Луны и некоторых видов горных пород, Вестн. Ленингр. ун-та 12, № 1, 152—157, 1957.

- Радлова Л. Н., Природа лунной поверхности, Природа, № 8, 23—28, 1939.
- Сытинская Н. Н., Природа лунной поверхности по данным фотометрических и колориметрических наблюдений, Природа, № 9, 93—94, 1952.
- Сытинская Н. Н. и Шаронов В. В., Проблема исследования лунной поверхности фотометрическим и колориметрическим путем, Вестн. Ленингр. ун-та 7, № 9, 97—109, 1952.
- Сытинская Н. Н., Влияние метеоров на природу планет и спутников солнечной системы, Труды Сталинабадской обсерв. 20, 106—113, 1954.
- Сытинская Н. Н., Результаты одновременного сопоставления лунных объектов и горных пород по светлоте и цвету, Астрон. цирк. № 153, 17—18, 1954.
- Сытинская Н. Н., Происхождение и природа наружного покрова лунной поверхности по данным сравнительного изучения диаграмм светлота—цвет, Учен. зап. Ленингр. ун-та 190, 74—87, 1957.
- Сытинская Н. Н., Взрывы метеоритов как фактор переработки лунной поверхности, Вопросы космогонии, вып. 5, 1957.
- Шаронов В. В., О природе кратеров-фантомов, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 30, 3—4, 1952.
- Шаронов В. В., Перемещение теней как фактор разрушения лунной поверхности, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 30, 4—5, 1952.
- Шаронов В. В., Вероятное состояние поверхности Луны по данным фотометрии и колориметрии, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 30, 5—7, 1952.
- Шаронов В. В., Опыт петрографического исследования лунной поверхности путем совместного применения фотометрических и колориметрических наблюдений, Астрон. журн. 31, № 5, 442—552, 1954.
- Minaert M., The reciprocity principle in lunar photometry, Astrophys. Journ. 93, 403—410, 1941.
- Schoenberg E., Untersuchungen zur Theorie der Beleuchtung des Mondes auf Grund photometrischer Messungen, Acta Societ. Scient. Fennicae 50, № 9, 1925.
- Tschunko H., Theoretische Photometrie des Erdmondes, Zeitschr. f. Astrophys. 26, 279—294, 1949.

ГЛАВА VIII

ОПТИКА ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР

§ 47. Газовая оболочка небесного тела

Наличие атмосферы над поверхностью планеты или спутника является обстоятельством первостепенной важности. В частности, оно позволяет ставить вопрос о существовании на поверхности небесного тела воды в жидком состоянии, а также явлений жизни. Естественно, что решение вопроса о наличии или отсутствии газовой оболочки для каждой из планет всегда считалось одной из основных проблем планетоведения.

С практической стороны решение вопроса основано на наблюдении тех разнообразных оптических явлений, которыми сопровождается проникновение солнечных лучей в атмосферу небесного тела и которые подробно исследованы на примере земной атмосферы. Из явлений такого рода для установления самого факта существования атмосферы наибольшее значение имеют нижеследующие:

1. *Рефракция, или преломление лучей.* Проявляет себя преимущественно у края диска планеты или спутника при таких явлениях, как покрытия звезд и других светил, прохождения перед солнечным диском, затмения.

2. *Рассеяние света.* В случае полупрозрачной атмосферы (Марс) создает на фоне диска эффект воздушной дымки, накладывающей свою дополнительную яркость на фон деталей твердой поверхности. При наличии на поверхности теней осветляет их еще за счет поступающей на затененные участки рассеянной освещенности. При атмосфере большой оптической толщины, т. е. непрозрачной, целиком определяет распределение яркости и цвета на планетном диске.

3. *Появление и исчезновение облачных образований.* Условия видимости последних на диске планеты также определяются явлением рассеяния света, которое, как правило, возрастает в местах возникновения облаков и туманов. Поэтому участки атмосферы с повышенной мутностью имеют вид изменчивых светлых пятен на диске светила. Временный и непостоянный характер таких