

2.1. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ

д.ф.-м.н., проф. Ю. Г. Шкуратов, к.ф.-м.н. Н. В. Опанасенко,
к.ф.-м.н. В. Г. Кайдаш, к.ф.-м.н. В. В. Корохин

Введение

Луна – ближайший к нам астрономический объект. Это небесное тело влияет на многие процессы, происходящие на Земле. Без Луны не было бы такой области земной биосферы, как полоса приливов и отливов вдоль берегов океанов; через нее вышли на сушу живые организмы. Не будет преувеличением сказать, что наша цивилизация обязана своим существованием приливам. Изучение Луны имеет большую историю, связанную не только с наукой, но и культурой мировой цивилизации (Шкуратов, 2006).

Для описания физических условий на лунной поверхности многое было сделано за последние 100 лет в Харьковской астрономической обсерватории. Исследование Луны является традиционным и одним из основных научных направлений на нашей обсерватории. Создал это направление академик Н. П. Барабашов в начале прошлого века. Многие годы Харьков занимал одно из лидирующих мест в изучении Луны. Однако в период активных космических исследований, когда исследования Луны телескопами отошли на второй план, позиции астрономической науки ослабли в этой области (и не только в Харькове).

Телескопические наблюдения Луны в Харькове ведутся с 1918 г. Они были начаты Н. П. Барабашовым по инициативе известного астрофизика В. Г. Фесенкова, который в то время работал на нашей обсерватории. Первоначально ставилась задача изучить закономерности отражения света Луной для того, чтобы определить фазовую зависимость яркости Земли по измерениям пепельного света. Для этого было необходимо провести исследование распределения яркости по лунному диску при разных углах фазы. Как часто бывает, вспомогательная задача вскоре стала основной и превратилась в научное направление, изучение оптических свойств лунной поверхности, которое развивается в Харьковском университете и в настоящее время.

Детальных фотометрических наблюдений Луны в Харькове было выполнено множество. В начале 20-х годов прошлого столетия Н. П. Барабашов (1922) провел большую серию высокоточных (для своего времени) измерений отдельных участков лунной поверхности, используя метод фотографической фотометрии. По тем временам это был новый метод количественного определения различий яркости лунных образований. На основе своих наблюдений Барабашов впервые описал возрастание яркости лунных образований с убыванием фазового угла как самостоятельный оптический эффект. Позднее это было названо эффектом обратного рассеяния. Этот эффект исследовался В. А. Федорец (Езерской) – ученицей Н. П. Барабашова. Он хорошо виден на фазовых зависимостях яркости лунных площадок, представленных в каталоге Федорец (1952). Этот каталог сыграл большую роль в определении режимов съемки Луны первыми космическими аппаратами.

В 60-е годы прошлого века между США и СССР происходила борьба за приоритеты в исследованиях космоса и, в частности, освоении Луны. Советская лунная программа была секретной, поэтому сотрудники нашей и других обсерваторий не могли в полной мере участвовать в обсуждении научных задач, постановке экспериментов и анализе данных космических аппаратов. Тем не менее, работы наших ученых влияли на формирование мнений людей, принимавших ответственные решения. Это видно из следующего примера. До посадки космического аппарата «Луна-9» на лунную поверхность ее несущая способность не была известна. Существовало две крайних точки зрения на этот счет. Первая – что поверхность Луны камениста и проблем с посадками аппаратов не будет. Вторая, высказанная американским астрономом Голдом, – что Луна покрыта мощным слоем тонкой пыли, в которой космические аппараты утонут при прилунении. Основываясь на фотометрических измерениях Луны и возможных земных аналогов материала лунной поверхности, Н. П. Барабашов и его ученики пришли к выводу, что Луна покрыта слоем мелкого щебня и, следовательно, ее несущая способность достаточно высока, чтобы выдерживать посадки космических аппаратов. Точка зрения Харьковской планетной школы оказалась ближе к истине; Главный конструктор советских ракет С. П. Королев ориентировался на модель поверхности, предложенную нашими астрономами.

Космическая гонка в исследованиях Луны между СССР и США закончилась в августе 1976 года, когда автоматическая станция «Луна-24» взяла грунт из Моря Кризисов и доставила его на Землю. После этого начался этап затишья, который распространился и на изучение лунной поверхности телескопическими методами. Затишье длилось 16 лет. Лишь в 1992 году космический зонд Галилей, совершая гравитационный маневр в системе Земля-Луна, передал высококачественные снимки, позволившие исследовать цветовые аномалии обратной стороны Луны [1]. В 1976 году никто не ожидал столь долгого перерыва. Одному из авторов этих строк (Ю.Г.Ш.) вспоминается атмосфера энтузиазма, перспектив, приобщенности к большому делу, царившая в августе 1976 г. в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР (ныне ГЕОХИ РАН, Москва), в который был доставлен лунный грунт советских аппаратов. Тогда нам (В. И. Езерскому и Ю. Г. Шкуратову) удалось увидеть только что привезенный лунный грунт. Сотрудник ГЕОХИ А. В. Иванов, водивший в те дни бесконечный поток экскурсий из высоких инстанций, сказал нам охрипшим голосом: «У вас есть 7 минут, чтобы посмотреть на лунный грунт, между визитом экипажа КА «Луноход-2» и визитом Президента Академии Наук СССР А. П. Александрова». Позднее грунт, доставленный советскими аппаратами, исследовался разными методами. В оптических исследованиях лунного грунта принимали участие харьковские астрономы.

Общее затишье в период 1976 – 1992 г.г. в исследованиях Луны не сказалось на интенсивности работ по лунной тематике в нашей обсерватории. На рис. 2.1.1 приведены кривые статистических распределений работ (статьи и тезисы конференций) по лунной тематике, которые выполнялись в Харькове, и аналогичная зависимость для работ, выполненных во всем мире, по данным Советского реферативного журнала. Виден максимум общей зависимости, который приходится на середину 60-х годов (время подготовки и осуществления лунных космических программ), и монотонный рост работ нашей обсерватории. У нас активизировались работы по теоретическому и компьютерному моделированию рассеяния света возможными аналогами грунта Луны и других безатмосферных небесных тел. Стали появляться новые наблюдательные данные, в частности, полученные на горных обсерваториях с хорошим астроклиматом, например, на обсерватории Майданак. В 80-е годы прошлого века использование особых режимов проявления фотопластинок и возможности компьютерной техники позволили поднять точность наших фотометрических и

поляриметрических измерений. Большую роль в наших работах того времени сыграл автоматический сканирующий микрофотометр, который был разработан и создан В. Г. Парусимовым в ГАО НАНУ. Он позволял считывать информацию с фотопластинок в форме, пригодной для последующего компьютерного анализа. Тогда же были завершены работы по созданию нового фотометрического каталога 256 лунных образований (Акимов, 1988), который пришел на смену каталогу В. А. Федорец. Примерно в то же время начались дискретные наблюдения Луны на спектрополяриметре ГАО НАНУ, который был установлен на 60-см телескопе обсерватории на горе Майданак (Н. В. Опанасенко, 1986 год). Эти наблюдения позволили позднее создать новый фотополяриметрический каталог лунных образований (Опанасенко и Шкуратов, 1994).

Современный этап исследований на нашей обсерватории характеризуется, прежде всего, широким использованием данных космической съемки Луны, проведенной КА «Галилео», «Клементина», «Лунар Проспектор» и «Смарт-1». Интенсивно развивается также направление, связанное с фотометрией и поляриметрией лунной поверхности с помощью телескопов.

Наиболее обширные и качественные данные были получены UVVis камерой КА «Клементина» [2]. Съемкой со 100 метровым разрешением в пяти областях видимого и ближнего ИК диапазона спектра была охвачена вся поверхность Луны. Использование этих данных, а также результатов химико-минералогических и спектральных измерений образцов лунного грунта, полученных консорциумом LSCC (Pieters et al., 2006), позволило построить карты распространенности некоторых химических элементов (например, Fe и Ti) и минералов (пироксен, плагиоклаз).

В 2004 г. наш Институт получил грант американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF). Это позволило профинансировать поездку наших астрономов-наблюдателей, Н. В. Опанасенко и Ю. И. Великодского, на обсерваторию Майданак (август-октябрь 2006 г.) для проведения фотометрических и поляриметрических измерений Луны. Для получения изображений использовались камеры Canon-300 и Canon-350D, которые позволяют регистрировать падающее излучение без преобразования сигнала процессором камеры (так называемый режим raw data – «сырые данные»). Матрицы камер предварительно исследовались на однородность, линейность, зависимость чувствительности и контраста от величины светового потока и времени экспозиции в красном и синем спектральных каналах. Матрицы этих камер показали удивительно высокое качество. В течение двух лунаций был получен уникальный наблюдательный материал объемом порядка 1 Тбайта. Наличие большого количества ясных ночей и отличные астроклиматические условия на горе Майданак обеспечили хорошее перекрытие данных по фазовому углу и высокое пространственное разрешение изображений, в среднем около 0,7". Этот материал может быть использован для решения многих задач фотометрии и поляриметрии.

Рассмотрим подробнее наиболее значимые результаты, полученные в Харькове в ходе фотометрических, спектрофотометрических и поляриметрических исследований Луны.

Фотометрия

Карты альбедо. Яркость площадки на лунной поверхности зависит от фазы Луны и местоположения этой площадки на лунном диске. В полной фазе, когда диск Луны кажется плоским, вариации яркости обусловлены вариациями отражательной способности поверхности (альбедо). В сравнении с другими оптическими характеристиками, распределение альбедо по лунной поверхности является наиболее доступным для исследования и, как следствие, наиболее изученным. Одна из первых надежных карт альбедо была составлена Н. Н. Евсюковым (1973) на Харьковской астрономической обсерватории по фотографическому снимку Луны, полученному при фазовом угле около 2° на длине волны $\lambda = 0,56$ мкм. Карта имеет около 30 градаций альбедо, представленных цветовой гаммой. В то время построение системы изолиний альбедо было нетривиальной задачей; описываемая карта была построена методом фотографической эквиденситометрии. Когда-то это было тонким ремеслом, которое теперь забыто. В качестве иллюстрации применения метода фотографической эквиденситометрии на рис. 2.1.2 представлено изображение центральной части лунного диска, на котором фотографическим способом выделены две изолинии (карта альбедо) (Шкуратов, 1978).

Н. Н. Евсюковым (1973) также была построена детальная цветная карта альбедо при длине волны $\lambda = 0,63$ мкм. Проводилось сравнение этой карты с аналогичной картой альбедо Вайлди и Пона [3], которая была построена немного раньше карты Евсюкова. В

целом, эти карты хорошо согласуются.

Для дальнейшего развития лунной фотометрии необходима новая абсолютизация (стандартизация) альбедных данных. До сих пор для этого используются довольно старые измерения Шаронова и Сытинской. Саари и Шортхилл [4] провели с использованием звезд-стандартов независимую абсолютную калибровку лунного альбеда при длине волны около 0,45 мкм и получили хорошее совпадение с оценками Шаронова и Сытинской [5]. Однако все эти данные устарели. Заявленная в них относительная точность 10 %, видимо, вполне соответствует действительности, но сейчас она кажется низкой. Во время майданакских наблюдений 2006 года наши астрономы Ю. И. Великодский и Н. В. Опанасенко получили уникальный наблюдательный материал, который позволит существенно улучшить оценки абсолютного альбеда Луны.

Глобальное распределение яркости по диску. При малых фазовых углах Луна видна как плоский диск. Объяснение этому дал Галилео Галилей. Он предположил, что лунная поверхность очень шероховата, а это означает, что независимо от того, смотрит ли наблюдатель на центр диска или на лимб, он увидит при нулевом фазовом угле одинаково много площадок, нормаль которых повернута в его сторону; отсюда и постоянство яркости.

Представляет интерес изучение того, насколько лунный диск при полной фазе равномерен по яркости, если отвлечься от вариаций альбеда. Этой проблемой еще в начале прошлого века начали заниматься Н. П. Барабашов и А. В. Марков (1922). В частности, ими было показано, что в полнолуние это распределение постоянно с точностью около 10–15 %.

При больших углах фазы на изображениях лунного диска (и даже невооруженным глазом) хорошо видно понижение яркости от лимба Луны к ее терминатору. В основном это долготный яркостной тренд. Широтная составляющая мала, хотя при больших фазовых углах хорошо наблюдаема. Ее обстоятельно исследовал сотрудник нашей обсерватории Л. А. Акимов, см. пример на рис. 2.1.3. Интересно отметить, что кроме Акимова количественные измерения широтного эффекта для Луны фактически никто не проводил.

Для решения некоторых задач необходимо описываемый яркостной тренд исключить. Обычно довольствуются устранением только долготной составляющей, используя закон Ломмеля-Зеелигера, который вообще не имеет параметров:

$$D_{L-Z}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} = \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\cos(\alpha - \gamma) + \cos \gamma}, \quad (1)$$

где i и e – угол падения и отражения, α и γ – угол фазы и фотометрическая долгота, соответственно. Как видно из этой формулы, при $\alpha = 0$ распределение превращается в константу. При небольших углах фазы результаты расчетов неплохо совпадают с измерениями. Однако при углах фазы, больших 70 – 80°, формула (1) дает заметный всплеск яркости на лимбе, который не наблюдается у Луны.

Для описания долготно-широтного распределения яркости по диску Луны с точностью 1% достаточно всего лишь одного параметра, если использовать следующую эмпирическую формулу Л. А. Акимова (1979):

$$D_{AE}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\cos \frac{\alpha}{2} \cos^q \beta \left(\cos^{q+1} \left(\gamma - \frac{\alpha}{2} \right) - \sin^{q+1} \frac{\alpha}{2} \right)}{\cos \gamma \left(1 - \sin^{q+1} \frac{\alpha}{2} \right)}, \quad (2)$$

где β – фотометрическая широта, q – эмпирический параметр, который отличается для разных поверхностей, в частности, для различных участков лунной поверхности. При $q = 1$ формула (2) превращается в закон Ламберта. Этот параметр может также зависеть от фазового угла. Так, Акимов показал, что $q = 0,31\alpha$ и $0,16\alpha$ для лунных материков и морей, соответственно. Акимовым (1975) была также теоретически получена формула, которая обеспечивает аппроксимацию наблюдательных данных (исключая терминатор) с точностью не хуже 5 %:

$$D_{AT}(\alpha, \beta, \gamma) = (\cos \beta)^{\alpha / (\pi - \alpha)} \frac{\cos \left[\frac{\pi}{\pi - \alpha} \left(\gamma - \frac{\alpha}{2} \right) \right]}{\cos \gamma}. \quad (3)$$

Как и закон Ломмеля-Зеелигера, формула (3) не содержит свободных параметров. Эта формула интересна тем, что описывает предельный случай в теоретической фотометрии предфрактальных поверхностей (см. раздел 2.6).

Интегральные наблюдения. При фотометрии Луны как точечного объекта происходит усреднение оптических характеристик ее поверхности. При наблюдениях с Земли интегральный блеск Луны является функцией двух переменных: фазового угла и длины волны. Надежные интегральные наблюдения Луны, результаты которых используются по сей день, были выполнены Ружье в 1933 г. [7] с помощью фотоэлемента. Измерения были выполнены в синих лучах при длине волны примерно 0,43 мкм. Лишь много лет спустя были предприняты попытки [8] повторить интегральные наблюдения Ружье в нескольких спектральных интервалах, используя более совершенную технику. К сожалению, эти попытки были не столь удачны, как наблюдения Ружье.

Данные Ружье не охватывают область малых фазовых углов, где наблюдается резкое возрастание яркости лунной поверхности, т.е. оппозиционный эффект, но их удалось дополнить данными КА «Клементина», которые позволяют продолжить кривую Ружье вплоть до нулевого фазового угла (Shkuratov et al., 1999). Следует отметить работу (Корохин и др., 2007), в которой описана апостериорная коррекция имеющихся данных интегральной фотометрии Луны, позволившая уменьшить регулярные погрешности фазовых зависимостей яркости, связанные с вариациями параметров либрации. Либрационный эффект может достигать 4%. Разработан метод, позволяющий проводить корректное сопоставление интегральных измерений Луны с фотометрическими измерениями ее участков или лабораторных образцов – имитаторов лунного грунта. Для аппроксимации фазовых кривых интегрального альбеда в диапазоне фазовых углов $6^\circ - 120^\circ$ была предложена простая эмпирическая формула: $A_{eq}(\alpha) = m_1 e^{-\rho\alpha} + m_2 e^{-0.7\alpha}$, где α – угол фазы, ρ – коэффициент эффективной шероховатости, а $m_1 + m_2$ – альбеда поверхности при нулевом фазовом угле (Корохин и др., 2007).

Дискретная фотометрия. Эти слова подразумевают фотометрические измерения отдельных (малых) участков поверхности (в старых работах такая фотометрия иногда называется поверхностной). Существует ряд работ, в которых описываются результаты дискретной фотометрии Луны сначала визуальным, потом фотографическим и фотоэлектрическим методами. Здесь мы остановимся лишь на нескольких из них.

Большую роль в дискретной фотометрии Луны сыграла работа Федорец (1952), основанная на фотографических наблюдениях, которые были выполнены в Харьковской обсерватории. В. А. Федорец выполнила трудоемкую работу по созданию фотометрического каталога; она уточняла и расширяла его более 25 лет. Это был первый надежный фотометрический каталог Луны. Каталог содержит большой фактический материал, который широко использовался в 60-е годы прошлого века, в частности, для оценки структурной однородности лунной поверхности, проверки теоретических моделей светорассеяния лунной поверхностью, а также для проведения светотехнических расчетов при подготовке космических полетов к Луне. К сожалению, относительная точность данных этого каталога не высока (не лучше 10 – 15 %), и в настоящее время он устарел и почти не используется.

В начале 60-х годов появился новый фотометрический каталог американских ученых Саари и Шортхилла. Он оказался точнее каталога Федорец. Большой объем статистической обработки данных каталога Саари и Шортхилла был выполнен сотрудником нашей обсерватории В. А. Псаревым (1984), который показал, что параметры, характеризующие наклон фазовой зависимости, показывают двузначную зависимость от альбеда.

На смену каталогам Федорец и Саари-Шортхилл пришел новый фотометрический каталог Л. А. Акимова для 256 лунных площадок размером около $6''$. Наблюдения в 10-м кассегреневском фокусе 70-см телескопа АЗТ-8 нашей обсерватории были проведены в красных лучах, $\lambda = 0,65$ мкм. Использовались фотографические изображения Луны, а также данные дискретной фотоэлектрики; наблюдения проводились на протяжении 25 лет. Точность данных лежит в пределах нескольких процентов. Анализируя свой каталог, Акимов пришел к выводу, что в фотометрическом отношении Луна значительно более однородна, чем считалось ранее. На рис. 2.1.4 представлены фазовые зависимости яркости Луны, построенные по данным фотометрического каталога Акимова для двух лунных образований, кратеров Тихо и Платон. Построение таких фазовых зависимостей непросто, поскольку наблюдения Луны при разных фазах проводятся, как правило, при различных

либрациях, а, кроме того, разные точки лунной поверхности имеют разные условия освещения и наблюдения даже при одной и той же фазе. Для приведения фотометрических наблюдений к одинаковым условиям можно использовать, в частности, формулу (2) или (3). В случае рис. 2.1.4 эти условия соответствуют положению деталей на пересечении «зеркального» фотометрического меридиана и фотометрического экватора, когда выполняется условие $i = e$.

Оппозиционный эффект лунных деталей. Большой интерес представляет фотометрия Луны при фазовых углах несколько градусов. Исследования оппозиционного эффекта лунной поверхности с Земли в диапазоне углов фазы менее 1° невозможны из-за того, что Луна вступает при этом в область затмения. Лунную поверхность при меньших фазовых углах можно изучать либо располагаясь на этой поверхности, либо с помощью космических аппаратов, находящихся на окололунной орбите. Впервые оппозиционный эффект Луны в области фазовых углов менее 1° наблюдали астронавты КК «Аполлон-8». Было показано, что амплитуда этого эффекта не коррелирует ни с альбедо поверхности, ни с ее морфологическими особенностями [9]. Оппозиционный всплеск яркости исследовался также в других миссиях «Аполлон». Сравнительно недавно новые результаты, связанные с оппозиционным эффектом лунной поверхности в области предельно малых фазовых углов, были получены в нашем НИИ астрономии. Остановимся на них подробнее.

Среди изображений лунной поверхности, полученных UVVis камерой КА «Клементина», нашлось некоторое количество таких, которые включали точку нулевого фазового угла, т.е. точку тени, отбрасываемой космическим аппаратом на лунную поверхность. Это дало уникальную возможность исследовать оппозиционный эффект Луны в широком спектральном диапазоне. Для примера на рис. 2.1.5 а приведено изображение, на котором хорошо видно яркое диффузное пятно вокруг точки нулевого фазового угла (контраст изображения усилен). Изображение охватывает небольшой участок на северо-востоке залива Центрального. Участок перекрыт лучами кратера Триснеккер.

Чтобы извлечь количественную информацию об оппозиционном пике из изображений типа того, что приведено на рис. 2.1.5 а, используется несколько методов. Например, в некоторых работах было предложено просто усреднять изображения, содержащие оппозиционное пятно, но так, чтобы у всех усредняемых снимков были бы совмещены центры оппозиционных пятен [10]. Такая процедура приводит к ослаблению случайных альбедных вариаций, видимых на изображениях, относительно регулярной оппозиционной составляющей. Этот прием не дает хорошей точности, поскольку изображений, которые можно усреднить для исследования оппозиционного эффекта, в наборе данных КА «Клементина» немного; альбедный узор все равно остается на результирующем изображении. Может так случиться, что в точке нулевого фазового угла окажется деталь (яркая или темная) – она будет воспринята как особенность в поведении фазовой функции.

Видимо, это и послужило причиной одной истории. В первых публикациях по результатам работы КК «Клементина» сообщалось об «открытии» узкого оппозиционного пика Луны шириной менее $0,25^\circ$ и амплитудой около 25% (см. кривые, соответствующие светлым символам на рис. 2.1.6) [2,10]. Это выглядело новым и очень эффектным результатом. Однако это «открытие» было скоро опровергнуто. Харьковские астрономы Ю. Г. Шкуратов и Д. Г. Станкевич обратили внимание на то, что столь узкий пик не может наблюдаться у Луны в принципе (Shkuratov and Stankevich, 1995). Дело в том, что угловой размер солнечного диска на расстоянии 1 а.е. составляет $0,5^\circ$, что заведомо больше ширины «открытого» пика. Поскольку каждая точка солнечного диска может рассматриваться как некогерентный источник, имеющий собственный угол фазы, любой узкий пик должен размываться, приобретая характерную ширину около $0,5^\circ$ и никак не меньше.

Более изощренные способы исследования оппозиционного эффекта по данным КА «Клементина» были предложены в работах М. А. Креславского и Ю. Г. Шкуратова (например, Shkuratov et al., 1999). Один из этих способов основан на следующем. Из-за движения космического аппарата вдоль лунной поверхности точка нулевого фазового угла также смещается по поверхности. Если время, прошедшее между сменой светофильтра, достаточно мало, то и смещение окажется малым. Если взять изображения, полученные последовательно в двух близких спектральных каналах, совместить их по альбедному узору, а затем построить отношение этих изображений, то альбедные вариации на таком изображении исчезнут (взаимно компенсируются). Останутся только вариации показателя

цвета, которые малы благодаря выбору близких спектральных каналов, и вариации, обусловленные сдвигом оппозиционного пятна в пределах кадра. На рис. 2.1.5 б приведено отношение изображения LUD2271J.167 ($\lambda = 0,95$ мкм) к изображению LUC2275J.167 ($\lambda = 0,90$ мкм). На результирующем изображении хорошо видна специфическая картина, связанная со взаимным сдвигом оппозиционных пятен примерно на угол фазы $0,2^\circ$; в первом приближении это распределение производной фазовой функции. Зная фазовый угол для каждой точки на обоих изображениях, можно вычислить по результирующему изображению эту производную в каждой точке кадра. Затем найденные производные усредняются для каждого из значений фазового угла. Интегрирование производной дает фазовую кривую яркости. Результаты такого интегрирования представлены на рис. 2.1.6. Кривые, соответствующие темным символам, отвечают обработке данных описанным методом. Как видно, ход этих кривых не похож на тот, что был открыт американцами; оппозиционный всплеск исследуемых участков поверхности в диапазоне фазовых углов $0,2 - 1,6^\circ$ довольно слабый (почти линейный); наблюдается даже тенденция к сглаживанию зависимости при очень малых углах фазы $< 0,25^\circ$. Это сглаживание определяется угловым размером солнечного диска.

Фазовые отношения. Если изображение, полученное при некотором фазовом угле α_1 , разделить на изображение того же участка, полученное при другом фазовом угле α_2 , то получится изображение, передающее вариации наклона фазовой зависимости в данном диапазоне фазовых углов, $\phi(\alpha_1)/\phi(\alpha_2)$. Одна из первых попыток сделать это была предпринята в работе (Акимов и Шкуратов, 1981). Использовался метод аналогового фотографического вычитания плотностей равноконтрастных изображений, полученных при разных фазовых углах, но близких параметрах либрации Луны (вычитание фотографических плотностей эквивалентно делению интенсивностей). Снимки были получены при фазовых углах $3,2^\circ$ и $14,5^\circ$ при длине волны $0,55$ мкм. Первые изображения фазового отношения были невысокого качества, поскольку нельзя подобрать снимки с абсолютно точно совпадающими параметрами либрации. Тем не менее, на этих изображениях было видно, что наибольшей крутизной в исследуемом диапазоне углов фаз обладают участки со средним альбедо (светлые моря или темный материк).

В 90-е годы распределения нескольких фазовых отношений видимого полушария Луны были получены цифровыми методами, позволяющими привести изображения Луны к одинаковым параметрам либрации. Для примера на рис. 2.1.7 представлены изображения альбедо и фазовых отношений ($90^\circ/18^\circ$) и ($134^\circ/90^\circ$) для района, включающего образование Рейнер-гамма (в центре изображений), которые были построены Н. В. Опанасенко. Это образование не имеет заметного рельефа, такого, как, например, кратер Рейнер (см. рис. 2.1.7 а, правее образования Рейнер-гамма). Отметим, что фазовый угол 134° – это практически предельный угол, достижимый при наблюдениях свирла Рейнер-гамма с Земли. Изображение на рис. 2.1.7 б показывает, что, в среднем, наклон фазовой зависимости в диапазоне $18 - 90^\circ$ ниже у Рейнер-гамма, чем у окружающих областей. Иная картина наблюдается в диапазоне фазовых углов $90 - 134^\circ$ (рис. 2.1.7 с). В этом диапазоне наклон фазовых кривых выше для поверхности Рейнер-гамма. Это может свидетельствовать о том, что поверхность Рейнер-гамма обладает сложным мезорельефом, который не разрешается на снимках, но дает вклад в затенение при больших фазовых углах. Это могут быть небольшие кратеры или каменные поля.

Параметры фотометрической функции. Сравнительно новой задачей лунной фотометрии является построение изображений или карт Луны для параметров, описывающих фотометрическую функцию. Для исследования можно выбрать параметры теоретических зависимостей, моделирующих экспериментальные данные, или параметры соответствующих эмпирических формул. Региональное распределение таких параметров несет более конкретную информацию о структурных особенностях лунной поверхности, в сравнении с изображениями фазовых наклонов. Некоторые параметры структуры поверхностного слоя Луны (например, характерный наклон на базе порядка 10 м) коррелируют с экспозиционным возрастом поверхности. Это открывает возможность независимой оценки относительного возраста по данным оптических измерений.

Простейшей функцией, которая хорошо описывает фазовые зависимости яркости в диапазоне $5^\circ - 50^\circ$, является функция вида $\phi(\alpha) = \exp(-\tau\alpha)$. Если имеются изображения, полученные для некоторого набора фазовых углов из диапазона $5^\circ - 50^\circ$, то совместный

анализ этих изображений позволит построить распределение параметра τ , который зависит от шероховатости поверхности и его альбедо. Именно такую обработку данных удалось провести для участка формации Рейнер-гамма, который был отснят КА «Клементина» при многих фазовых углах (свыше 50 значений) (Kreslavsky and Shkuratov, 2003). Таким образом, для каждой точки предварительно совмещенных друг с другом изображений строится фазовая зависимость. Методом наименьших квадратов эта зависимость аппроксимируется функцией $\exp(-\tau\alpha)$, т.е. для каждой точки определяется значение τ . Результат такой обработки приведен на рис. 2.1.8. Сравнивая изображения (a) и (b) на этом рисунке, можно видеть, что в целом величина τ выше для тех участков, которые имеют более низкое альбедо. Однако наблюдаются исключения. Например, темные альбедные детали, показанные на рис. 2.1.8 а черными короткими стрелками, имеют низкие значения τ , т.е. пологие фазовые зависимости, в сравнении с окружающими областями. Эти аномалии отражают аномалии структуры поверхностного слоя лунного реголита. Вероятно, здесь произошло накопление темного мелкозернистого материала, который сгладил микрорельеф. В то же время, образование, показанное белой стрелкой на рис. 2.1.8 а, имеет одно-временно сравнительно высокое альбедо и величину τ . В частности, деталь, показанная белой стрелкой на рис. 2.1.8 а, ассоциируется с зоной выбросов молодого кратера; ее поверхность содержит, вероятно, большое количество свежих камней и блоков, вынесенных на поверхность ударом. Таким образом, описываемый метод может быть использован для определения мест со структурой, нетипичной для окружающей поверхности.

Восстановление рельефа по фотометрическим изображениям. Вариации яркости на изображениях Луны, полученных при фазовых углах, отличных от нуля, связаны не только с изменениями отражательной способности вещества поверхности, но и несут информацию о ее локальных наклонах. Особенно сильно топографический эффект яркости проявляется при больших фазовых углах. Если имеется несколько изображений, полученных при разных высотах и азимутах Солнца, но при одинаковых условиях наблюдения поверхности, можно ставить задачу определения поля локальных наклонов (а тем самым и поля высот) поверхности; это задача фотоклинометрии. Более востребованным оказался метод фотограмметрии. Условия, при которых применим этот метод, отличаются от предыдущего случая. Для фотограмметрии необходимо иметь стерео пары изображений; каждое из них должно быть получено при одних и тех же условиях освещения, но немного отличающихся условиях наблюдения. Фотограмметрическая задача может быть описана математически. Алгоритмы восстановления рельефа и необходимые программные средства были созданы в НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина (Oranassenko et al., 2007, Kaydash et al., 2007). Для компьютерного фотограмметрического анализа использовались изображения района места посадки КК «Аполлон-17», полученные КА «Клементина» и космическим телескопом «Хаббл». Изображения имеют почти одинаковое пространственное разрешение (около 100 м/пиксел); они получены в близких длинах волн. Так совпало, что условия освещения этого участка также были близкими. Отличались лишь углы визирования: в случае КА «Клементина» ось камеры UVVis была направлена точно вниз (в надир), тогда как телескоп Хаббла снимал поверхность под углом, приблизительно равным широте места посадки КК «Аполлон-17», т.е. при наклоне луча зрения от нормали примерно на 25° (см. рис. 2.1.9).

По этой паре удалось построить карту рельефа поверхности. Это стало возможным, потому что участки поверхности, имеющие разную высоту, проектируются немного по-разному на картинную плоскость при получении надирного изображения и снимка при угле визирования 25° . По величине относительного смещения деталей на этих изображениях оценивалась высота рельефа; карта высот показана на рис. 2.1.10. Она охватывает район долины Тавр Литтров (место посадки КК «Аполлон-17»). Эта карта сравнивалась с данными топографической карты Геологической службы США, построенной ранее для этого района; получилось превосходное согласие. Наличие высотных распределений позволяет моделировать произвольные условия освещения и наблюдения исследуемого района. Так, на рис. 2.1.11 показано перспективное изображение долины Тавр Литтров в двух вариантах, когда альбедные вариации удалены с изображения рельефа (a) и когда они оставлены (b).

Примером решения фотоклинометрической задачи могут служить работа В. В. Корохина (1999), выполненная в Харьковской астрономической обсерватории. По телескопическим снимкам Луны, полученным при разных фазовых углах, были определены наклоны лунной поверхности на базе 2 км в направлении вдоль широт (рис. 2.1.12 а). Использовалось предположение о малости наклонов. Одновременно при решении фото-

клинометрической задачи было определено распределение альбедо для исследуемого участка поверхности (рис. 2.1.12 b). Этот участок представляет собой сектор; края лунного диска слева и справа «подрезаны», поскольку эти области находятся в тени при максимальных фазовых углах. Наклоны поверхности на рис. 2.1.12 а отображены так, чтобы дать представление о направлении нормали площадки. Серый фон отвечает нулевому наклону, светлый фон и темные тона отвечают отклонению нормали площадок, соответственно, к востоку (вправо) и к западу (влево). К сожалению, эти данные не дают возможность построить поле высот рельефа, поскольку изменения направления освещенности поверхности Луны при наблюдениях с Земли происходят практически в одной плоскости (либрационные колебания этого направления малы, и ими практически не удастся воспользоваться).

Спектрофотометрия и колориметрия

Луна светит отраженным солнечным светом, поэтому для нахождения спектрального хода альбедо лунной поверхности необходимо измеренный спектр разделить на спектр Солнца. Отношение альбедо лунной поверхности, измеренных в разных длинах волн, называется показателем цвета (колор-индексом). Целью колориметрии Луны является исследование распределения по лунной поверхности различных показателей цвета (альбедных отношений).

Спектрофотометрия. В 19 веке многие астрономы пытались с помощью спектро-скопа обнаружить спектральные особенности различных участков Луны, но результат был обескураживающий – всегда наблюдались спектральные детали, совпадающие с системой солнечных фраунгоферовых линий. С другой стороны, когда начались количественные измерения спектров, возникла другая крайность. Если солнечные данные недостаточно надежны, то при делении спектра лунного излучения на спектр солнечного в результирующем спектре лунного альбедо появляются ложные детали. Надежные данные о солнечном спектре появились только в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия. До этого было много сообщений об открытии полос поглощения и даже эмиссии в видимой части спектра лунного альбедо. Последующие измерения показали, что спектр лунной поверхности очень ровный и практически не имеет никаких абсорбционных (а тем более, эмиссионных) особенностей. Здесь следует отметить работу, выполненную в Харьковской обсерватории с помощью целостатной установки спектрогелиографа (Барабашов и др., 1959), в которой впервые этот вывод был сделан и проиллюстрирован измерениями. В указанной работе регистрировались спектры лунных образований, а затем днем снимались спектры Солнца с помощью той же установки. Это дало возможность избежать влияния инструментальных ошибок при делении лунного спектра на солнечный. Вывод был таким: все небольшие нерегулярности лунного спектра находятся на уровне погрешностей и что в диапазоне длин волн 0,44 – 0,60 микрон спектры лунных деталей практически линейны.

Спектриметрия Луны в видимой и ближней ИК области спектра в обсерваториях бывшего СССР практически не проводилась; зато эти работы развернулись широким фронтом в США (Томас Маккорд, Карли Питерс) [11,12]. В Харьковской обсерватории в конце 70-х годов был эпизод, связанный со спектрометрией Луны. Ю. Г. Шкуратов провел серию спектральных наблюдений Луны на телескопе АЗТ-8 Шемахинской Астрофизической Обсерватории с целью уточнить калибровку карты цвета Евсюкова (1973) (Езерский и др., 1982). Измерения показали необходимость коррекции шкалы карты цвета (Евсюков, 1973); ее необходимо умножить на множитель 1.33.

Перспективным средством поиска слабых полос поглощения излучения, рассеянного лунным грунтом, является спектрополяриметрия. Измерения спектральной зависимости степени поляризации являются более точными, чем спектральные измерения альбедо, поскольку они всегда относительны – не требуется деление на солнечный спектр и т. п. Спектрополяриметрический метод основан на следующем. Для реголитоподобных поверхностей существует тесная обратная корреляция между альбедо и степенью поляризации, измеренной при достаточно больших фазовых углах, – это называется эффектом Умова. Благодаря этому эффекту, все особенности спектрального хода альбедо проявляются в соответствующем спектральном поведении степени поляризации. В работе (Опанасенко и Шкуратов, 1994) предпринималась попытка обнаружить таким способом слабые полосы поглощения. Проводились спектрополяриметрические измерения при фазовом угле около 50° (положительная поляризация) в диапазоне 0,48 – 0,57 мкм с разрешением 20 ангстрем.

По уровню чувствительности несколько десятых процента никаких нерегулярностей спектра степени поляризации найдено не было.

Колориметрия (измерение показателей цвета). Цветовые различия деталей лунной поверхности видны глазом в телескоп-рефлектор. Отметим одну из первых попыток фотографирования Луны на цветную пленку, предпринятую Н. П. Барабашовым в 1953 г. В то время качество цветной пленки и возможности цветной печати были не очень высокими, поэтому о распределении цветовых оттенков с помощью полученных фотографий практически ничего нового не удалось узнать. Сейчас вариации цвета лунной поверхности легко регистрируются цифровой фотокамерой.

Показатели цвета количественно описывают цвет поверхности. Цветовые оттенки количественно характеризуются различными показателями цвета или цветовыми отношениями $C(\lambda_1/\lambda_2) = A(\lambda_1)/A(\lambda_2)$, где A – альbedo поверхности, λ_1 и λ_2 – несовпадающие длины волн. Колориметрические изображения – это такие изображения, которые передают распределение того или иного показателя цвета.

Первые качественные колориметрические изображения начал строить фотографическим методом известный исследователь Луны Ивен Вайтекер в 1965 году [13]. Метод основан на сложении равноконтрастных снимков позитива и негатива, в результате чего выявляются отличия одного изображения от другого, т.е. цветовые отличия. Тем же методом была создана первая карта цвета видимого полушария Луны (Евсюков, 1973). На рис. 2.1.13 приведено колориметрическое изображение района, который включает в себя Море Ясности и Море Спокойствия: слева – распределение альbedo, а справа – цветового отношения $C(0,63/0,44 \text{ мкм})$. Изображение показателя цвета построено фотографическим методом (Шкуратов, 1981). Это было очень непросто. Фотографические пластинки, которые использовались в то время, не обеспечивали достаточную фотометрическую однородность, точность измерений в лучшем случае составляла несколько процентов. Это было на пределе, необходимом для выполнения качественной лунной колориметрии. Приходилось принимать специальные меры для повышения точности исходных изображений. Для этого, в частности, обеспечивался особый режим проявления фотопластинок с сильным перемешиванием проявителя. Сейчас любительские цифровые камеры дают в несколько раз более высокую точность, чем фотоэмульсии.

Наилучшие колориметрические изображения Луны, которые представляют собой отношения двух альбедных изображений, $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$ и $C(0,950/0,750 \text{ мкм})$, были получены КА «Клементина». Далее, в отдельном разделе будет более детально рассмотрен вопрос, как использовать колориметрические данные для оценки химического и минералогического состава лунной поверхности. Здесь же мы дадим лишь предварительное описание такого использования. Возможность оценки состава по оптическим измерениям была впервые показана в работе [14]; в ней по данным лабораторных измерений зрелого морского грунта была построена калибровочная зависимость показателя цвета $C(0,40/0,56 \text{ мкм})$ от содержания двуокиси титана (отметим, что почти одновременно аналогичная зависимость была построена по средним данным для мест посадок харьковским астрономом Н. Н. Евсюковым). Тогда же было отмечено, что на величину показателя цвета $C(0,40/0,56 \text{ мкм})$ оказывает влияние зрелость грунта. В самом первом приближении можно считать, что цветовые особенности молодых кратеров по колор-индексам $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$ и $C(0,950/0,415 \text{ мкм})$ связаны с низкой зрелостью слагающего их материала. Различия цветового отношения $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$ в морях связано с вариациями титана: чем больше титана, тем ниже значения $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$. Аналогично, различия цветового отношения $C(0,950/0,750 \text{ мкм})$ в морях и материках (исключая кратеры) связаны с вариациями железа: чем больше железа, тем ниже значения $C(0,950/0,750 \text{ мкм})$.

Показатели цвета лунной поверхности сравнительно слабо зависят от условий освещения. Это дает возможность накапливать и сопоставлять данные, полученные при разных фазовых углах. Фазовые зависимости цвета Луны практически отсутствуют. Пожалуй, достоверно известно, что общий наклон спектра несколько увеличивается к квадратурам. Однако есть некоторые указания на то, что при больших углах фазы этот наклон снова уменьшается (Евсюков, 1974). Возможны тонкие особенности поведения показателей цвета Луны при малых углах фазы; об этом свидетельствуют, в частности, лабораторные колориметрические измерения лунного грунта (Акимов и др., 1980). На рис. 2.1.14 приведены фазовые зависимости цветового отношения $C(0,65/0,43 \text{ мкм})$ для материкового и морского грунтов. Различия поведения в пределах нескольких процентов

хорошо заметны. Морской зрелый грунт КА «Луна-16» показывает минимум в фазовой зависимости цвета примерно на 15° . В то же время, материковый незрелый реголит КА «Луна-20» не имеет такой особенности.

Поляриметрия

Поляризацию света, рассеянного Луной, открыл в 1811 г. Д. Ф. Араго [15]. Он интерпретировал возникновение поляризации влиянием лунной атмосферы. В 1863 году аббат Арканжело Секки правильно предположил, что причиной поляризации света, рассеянного Луной, является сама лунная поверхность [16]. Он подтвердил, что степень поляризации света, рассеянного морями, выше, чем в случае материков, и что плоскость поляризации перпендикулярна плоскости рассеяния. Работа кардинальной значимости для поляриметрии планет была проведена Бернаром Лио в 1929 г. [17]. Прежде всего, в этой работе впервые сообщается об открытии во время наблюдений 1922 г. ветви отрицательной поляризации света, рассеянного Луной при малых углах фазы. Аналогичный эффект был найден Лио и в лабораторных измерениях порошков различного происхождения. Аналогичная по значимости работа была сделана в СССР Н. П. Барабашовым в 1926 г. в Харькове. Им было, в частности, показано, что максимум положительной поляризации Луны сильно размыт, и что его затруднительно использовать для целей диагностики.

На первый взгляд, поляриметрия Луны кажется очень доступной: вблизи квадратур величина положительной поляризации настолько велика, что была визуально обнаружена Араго с помощью полярископа. Однако хорошо заметные различия поляризующей способности лунных морей и материков долгое время не удавалось использовать для прямых оценок физических свойств лунной поверхности. Трудности обусловлены тем, что при больших фазовых углах степень поляризации света, рассеянного лунной поверхностью, тесно коррелирует с ее альбедо (эффект Умова). Поэтому информацию, которую несет степень поляризации при больших фазовых углах, можно в первом приближении получить, исследуя альбедо, что проще. В 1980 г. было показано (Шкуратов и др., 1980), что информативными являются отклонения от линии регрессии корреляционной зависимости альбедо – степень поляризации. Для количественного описания этих отклонений был введен параметр поляриметрических аномалий, который оказался тесно связанным с некоторыми структурными характеристиками лунной поверхности, как пористость и средний размер частиц реголита. Тогда же были построены первые изображения Луны в этом параметре.

Отрицательная поляризация. Прямой солнечный свет является неполяризованным по уровню чувствительности 10^{-6} . При рассеянии лунной поверхностью солнечного света он частично линейно поляризуется. Причем при фазовых углах больше 23° эта поляризация положительна – это означает, что электрический вектор отраженного Луной света имеет преимущественные колебания в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, а при фазовых углах меньше 23° эта поляризация отрицательна, т.е. электрический вектор отраженного Луной света имеет преимущественные колебания в плоскости рассеяния. Исследования отрицательной ветви поляризации сложны, т.к. приходится измерять вариации малых величин. Природа этой поляризации до сих пор не понятна. В настоящее время известно, что широкие ветви отрицательной поляризации света, рассеянного твердыми поверхностями безатмосферных небесных тел (в том числе Луны), скорее всего, обусловлены одночастичным рассеянием; при этом некогерентное многократное рассеяние может лишь ослаблять поляризацию.

Величина минимума отрицательной поляризации, будучи всего около 1%, варьируется по лунной поверхности в пределах примерно от 0,5 до 1,5%. В 1993 г. в работе Н. В. Опанасенко и др. была сделана попытка получить изображение лунной поверхности, передающее распределение параметра $|P_{\min}|$. Качественно это изображение согласуется с данными дискретных поляриметрических измерений. Оказалось, что наибольшие значения параметра $|P_{\min}|$ характерны для участков поверхности со средним альбедо. На изображении хорошо выделяются лучевые системы кратеров, имеющие пониженные значения $|P_{\min}|$. Подтверждение этих результатов представлено на рис. 2.1.15. Здесь показаны распределения альбедо и величины $|P_{\min}|$ (южная часть Океана Бурь и Море Влажности), полученные недавно Н. В. Опанасенко на Харьковском 50-см телескопе Обсерватории Майданак с помощью камеры Canon-350D.

Положительная поляризация и параметр поляриметрических аномалий. При углах фазы больше примерно 23° у Луны наблюдается положительная поляризация. Положительная ветвь простирается в сторону больших фазовых углов вплоть до углов около 165° – максимум, который достигнут в наземных наблюдениях. Как отмечалось, степень положительной поляризации тесно коррелирует с альбедо A поверхности (эффект Умова). Эта корреляция близка к линейной, если использовать логарифмические оси. Особенно тесной она оказывается для максимальной степени поляризации P_{\max} . По дискретным измерениям участков лунной поверхности было получено следующее уравнение регрессии для параметров A и P_{\max} : $\lg A + a \lg P_{\max} = b$, где a и b – константы [18]. Для описания отклонений от линии регрессии можно использовать величину b как параметр $b = \log AP_{\max}^a$ (Шкуратов и др., 1980). Оказалось, что этот параметр тесно связан со средним размером частиц светорассеивающей поверхности d . С помощью данных лабораторных измерений лунного грунта удалось построить калибровочную зависимость ($d[\text{мкм}] = 0,03 \exp(-2,9b)$), которая применялась для оценок вариаций размера частиц лунной поверхности (Shkuratov and Opanasenko, 1992).

На рис. 2.1.16 приведены изображения, построенные Н. В. Опанасенко по результатам фотополариметрической съемки Луны, выполненной на 60-см телескопе (гора Майданак) в синих лучах ($\lambda = 0,42$ мкм) при фазовом угле 88° . При съемке ось поляроида ориентировалась перпендикулярно либо параллельно плоскости рассеяния. Затем были получены изображения, которые передают распределение яркости с компенсированным долготно-широтным ходом яркости (рис. 2.1.16 а), степени поляризации (рис. 2.1.16 б) и параметра $b = \log AP_{\max}^a$ (рис. 2.1.16 с). Как следовало ожидать, первые два изображения сильно антикоррелируют друг с другом (эффект Умова). Последнее изображение выглядит совершенно непохожим на предыдущие два; оно качественно передает распределение среднего размера частиц (темным тонам отвечают меньшие размеры частиц). Из приведенного изображения (рис. 2.1.16 с) видно, что материковая поверхность в среднем более мелкозерниста. Яркие молодые кратеры имеют грунт со сравнительно большим средним размером частиц, что согласуется с тем, что это грунт незрелый. Мелкодисперсный материал характерен для областей, в которых возможно присутствие пирокластических отложений – это область холмов Мариуса, плато Аристарха и пик Рюмкера.

Удачная попытка построить изображение, передающее распределение α_{\max} (угол фазы, при котором достигается максимум поляризации), была предпринята В. В. Корохиным и Ю. И. Великодским (2005 г.). На рис. 2.1.17 представлено такое изображение для восточной четверти Луны; оно было получено при длине волны 0,46 мкм. Распределение этой характеристики довольно хорошо коррелирует с альбедо лунной поверхности: чем выше альбедо, тем меньше α_{\max} .

Если проводить поляриметрию Луны в нескольких участках спектра, то можно исследовать так называемый спектрополяроиндекс $C_P(\lambda_1/\lambda_2)$. Он определяется по аналогии с показателем цвета в колориметрии, как $C_P(\lambda_1/\lambda_2) = P(\lambda_1)/P(\lambda_2)$, где $P(\lambda)$ – степень поляризации при длине волны λ . В принципе эта величина может исследоваться при любом фазовом угле, для которого величины $P(\lambda_1)$ и $P(\lambda_2)$ заметно отличаются от нуля, в том числе, в максимуме поляризации. Данные о связи показателя $C_P(\lambda_1/\lambda_2)$ с другими физическими характеристиками поверхности немногочисленны. Первая попытка построить изображение, передающее распределение отношения $P_{\max}(0,67 \text{ мкм})/P_{\max}(0,46 \text{ мкм})$, была сделана в работе (Корохин и Великодский, 2005). На рис. 2.1.18 показано такое изображение. Хорошо видно, что это распределение в целом коррелирует с альбедо, однако в деталях отличия могут быть велики.

Прогнозирование свойств поверхности по колориметрическим данным

Здесь мы представим результаты картирования: (1) химических и минералогических параметров лунного реголита, (2) толщины реголитового слоя (используются также радиолокационные данные) и (3) содержания в лунном грунте гелия-3.

Химический состав реголита. Химические элементы Si, O, Fe, Ti, Al, Ca и Mg являются главными элементами в составе лунных пород. Часто элементное содержание пересчитывают в содержание соответствующих окислов, например, SiO_2 , FeO , TiO_2 , Al_2O_3 , CaO и MgO . Далее используются оба представления. Существует несколько методов

оптической диагностики состава лунного грунта. Главная проблема в этих методах – это разделение влияния на оптические характеристики зрелости реголита и его состава. Один из методов разделения такого влияния был предложен известным американским планетологом Полом Люси в 1995 году [19]. Метод Люси опирается на результаты лабораторных оптических исследований лунного грунта, которые показали закономерность в расположении на диаграмме $A(0,75 \text{ мкм}) - C(0,95/0,75 \text{ мкм})$ точек, отвечающих образцам разной степени зрелости и состава. Оказалось, что образцы с близким содержанием железа, но разной степенью зрелости образуют последовательности, приблизительно ориентированные в направлении некоторой особой точки диаграммы (точка сверхзрелости), причем расстояние от этой точки характеризует степень зрелости образца: чем меньше расстояние, тем выше зрелость. Используя это, Люси предложил перейти на плоскости $A(0,75 \text{ мкм})$, $C(0,95/0,75 \text{ мкм})$ к новой системе полярных координат с центром в точке сверхзрелости. В этом случае полярный угол связан с содержанием железа, а радиальная координата – со зрелостью образцов грунта. Затем был предложен аналогичный подход для «разделения» влияния на альбедо $A(0,750 \text{ мкм})$ и показатель цвета $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$ степени зрелости реголита и содержания в нем двуокиси титана.

Существует, однако, альтернативный путь использования изображений альбедо, полученных в разных фильтрах. В нем используются данные лабораторных оптических и химико-минералогических измерений образцов лунного грунта. Эти измерения были выполнены в рамках работ LSCC, что означает Lunar Soil Characterization Consortium. Этот консорциум был создан американскими учеными Ларри Тэйлором и Карли Питерс; позднее к этой группе исследователей подключились харьковские астрономы (В. Г. Кайдаш, В. В. Корохин, Д. Г. Станкевич, Ю. Г. Шкуратов). Исследовался химический и минеральный состав нескольких десятков представительных образцов лунного реголита и сняты оптические спектры тех же образцов. Такие исследования дают возможность изучать корреляцию между химико-минералогическими и оптическими параметрами, а затем использовать найденные корреляции для прогноза состава лунной поверхности. Эта программа была реализована указанными сотрудниками НИИ астрономии. Для выполнения химического и минералогического картографирования лунной поверхности использовались результаты съемки, проведенной КА «Клементина» с помощью камеры UVVis в пяти длинах волн: 0,415; 0,750; 0,900; 0,950 и 1,000 мкм. Следует отметить, что фотометрические системы лабораторных спектральных измерений лунного грунта и спектрозональных данных, полученных КА «Клементина», одинаковы. Это принципиально важно для описываемого анализа. Карты прогноза содержания основных пороодообразующих окислов строились по данным LSCC с использованием простой линейной комбинации альбедо в указанных длинах волн. Для примера на рис. 2.1.19 представлена карта распределения FeO (Shkuratov et al., 2003).

Для картирования химических параметров лунной поверхности можно использовать аналогичным образом данные геохимической съемки КА «Лунар Проспектор». Оптическая съемка лунной поверхности дает информацию о верхнем слое толщиной примерно 1 мм. Геохимическая съемка с помощью гамма-спектроскопии позволяет исследовать слой толщиной до 1 м. Если считать, что состав реголита для этих глубин примерно одинаков, то геохимические данные можно в принципе использовать как «обучающие» (вместо образцов лунного грунта). Этот план был реализован в работе (Shkuratov et al., 2005). Данные КА «Лунар Проспектор» существуют в виде карт (изображений) с разрешением примерно $5^\circ \times 5^\circ$ (150 км \times 150 км на экваторе). «Строчная» и «кадровая» развертка изображений проводилась за счет, соответственно, орбитального движения КА и вращения Луны. Столь низкое разрешение геохимической съемки связано с тем, что нейтронные и гамма-детекторы, установленные на космическом аппарате, измеряют сигнал от всей нижней полусферы; при высоте орбиты 150 км подаппаратная площадка примерно 150 км \times 150 км на лунной поверхности дает доминирующий вклад в сигнал.

Для апостериорного повышения пространственного разрешения данных геохимической съемки можно использовать количественную связь между оптическими и геохимическими параметрами (Shkuratov et al., 2005). Для выявления таких связей разрешение оптических данных КА «Клементина» было приведено к разрешению геохимических (150 км). Затем найденное уравнение связи между оптическими и геохимическими параметрами лунной поверхности применялось для картирования состава лунного грунта (Fe, Ti, O,

Al, Ca и Mg) по оптическим данным КА «Клементина» более высокого разрешения (15 км). Рисунки 2.1.20 – 2.1.22 представляют карты Fe, Ti, O, соответственно. Верхние панели отвечают исходным распределениям КА «Лунар Проспектор» низкого разрешения; нижние – представляют результаты повышения разрешения через связь с оптическими данными. Виден огромный выигрыш в четкости новых карт. Среди перечисленных элементов имеется не хромофорный элемент, кислород. Может возникнуть вопрос, каким же образом работает методика; как по оптическим данным можно предсказать распределение элементов, не влияющих на оптические свойства грунта? Дело в том, что содержание основных хромофорных элементов (Fe и Ti) коррелирует с содержанием нехромофорных элементов, например, O. Таким образом, корреляции оптических характеристик с концентрациями нехромофорных элементов являются косвенными. Опишем карту распределения кислорода. Как и следовало ожидать, кислорода оказывается меньше в морских породах (более основной состав). Обнаруживается большое разнообразие составов морских лавовых потоков. Аномалии по содержанию кислорода наблюдаются на материке, например, в области кратера Тихо.

Содержание минералов и зрелость реголита. Плаггиоклаз, пироксен и оливин являются основными породообразующими минералами лунной поверхности; плаггиоклаз наиболее распространен в материковых, а пироксен и оливин – в морских районах. Изучение регионального распределения содержания этих минералов и особенностей их состава картографическим методом является одной из важнейших задач дистанционной диагностики Луны. В развитии такой диагностики, равно как и диагностики химического состава, сделаны лишь первые шаги. Они основаны на использовании данных оптической съемки Луны КА «Клементина» и результатах спектральных и минералогических исследований образцов лунного грунта. Спектральные характеристики, по которым производится минералогический прогноз, существенно зависят не только от состава, но и от зрелости лунного грунта, т.е. параметра I_s/FeO . Как и в случае определения химических составов, среди многих комбинаций оптических параметров мы ищем такую комбинацию, которая для данного набора образцов лунного грунта максимально тесно коррелирует с тем или иным минералогическим параметром (Шкуратов и др., 2006). Далее используется простейшая линейная комбинация спектрального альбеда в четырех длинах волн. Анализ корреляций оптических и минералогических данных по образцам показал, что надежно можно выполнить картографирование содержания плаггиоклаза, пироксена и параметра зрелости I_s/FeO . Обозначим картируемые характеристики следующим образом: клинопироксен – CPx, плаггиоклаз – Plag и степень зрелости – I_s/FeO . На рис. 2.1.23 а-в приведены, соответственно, распределения CPx, Plag и I_s/FeO по лунной поверхности (Шкуратов и др., 2006). Как следовало ожидать, содержания клинопироксена и плаггиоклаза антикоррелируют. Содержание минералов (кристаллической компоненты) существенно зависит от возраста поверхности, а это означает, что оно должно коррелировать со степенью зрелости грунта. На карте содержания CPx в морских областях выделяются молодые кратеры. Высокое содержание CPx в этих областях (свыше 20 %) связано со сравнительно небольшим экспозиционным возрастом поверхности кратеров и зон их выбросов. Для этих участков кристаллическое вещество, в состав которого входит и CPx, не столь сильно изменено микрометеоритными ударами, поэтому его больше на этих участках по сравнению с другими районами. То же относится к свирлу Рейнер-гамма, в котором наблюдается некоторый избыток CPx по сравнению с окружающими морскими участками. Это согласуется с тем, что свирл Рейнер-гамма является одним из самых молодых образований на лунной поверхности. Много CPx входит в состав грунта в районе Южный полюс – кратер Эйткен (нижние углы мозаики). В большом количестве (> 20%) CPx присутствует в Океане Бурь в окрестности кратера Аристарх. Пониженное содержание этого минерала наблюдается в зонах некоторых молодых материковых кратеров. Возможно, это связано с вертикальной неоднородностью состава лунного материка (Шкуратов и др., 2006).

Избыток Plag (более 50 %) наблюдается в материковых кратерах; в зонах морских молодых кратеров такой аномалии практически не встречается. Исключение составляет кратер Аристарх, при образовании которого плаггиоклаз был извлечен ударом из материковой подложки. Высокое содержание плаггиоклаза в материале молодых материковых кратеров объясняется таким же образом, как и CPx аномалия в морских молодых кратерах: плаггиоклаз лучше сохранился в местах, где грунт в меньшей степени переработан

ударами метеоритов. Содержание плагиоклаза в Море Спокойствия оказывается несколько выше, чем для Моря Ясности. Лавы вдоль западной границы Океана Бурь имеют пониженное содержание плагиоклаза. Низким содержанием плагиоклаза выделяется также пятно Вуда. Особенностью распределения параметра I_s/FeO (см. рис. 2.1.23 в) является очень низкий контраст границы море – материк; то есть море и материк сложены грунтами примерно одинаковой зрелости. Как и следовало ожидать, низкой степенью зрелости обладают молодые кратеры, независимо от того, находятся ли они в морях или материках. Особенно низка зрелость в зоне кратера Джордано Бруно и его выбросов. Это согласуется с тем, что этот кратер является самым молодым из крупных ударных образований на Луне. Наибольшей зрелостью обладает реголит в местах, которые классифицируются как Dark Mantles. Эти области находятся в центре изображения (светлые пятна на рис. 2.1.23 в); примером может служить Залив Центральный.

Толщина реголитового слоя. Оценки мощности (толщины) слоя лунного реголита важны для понимания эволюции исследуемого участка поверхности и создания инженерных моделей, необходимых для планирования строительства будущих лунных баз. Определения мощности делаются несколькими методами. Геологические определения основаны на анализе морфологии кратеров и характеристик кратерной популяции. Определения мощности реголита были сделаны в местах посадок КК «Аполлон-11», «Аполлон-12», «Аполлон-14» – «Аполлон-17» в ходе сейсмических экспериментов. В месте посадки КК «Аполлон-17» производилось электромагнитное зондирование лунной поверхности; его результаты позволили сделать вывод о существовании слоя мегареголита на глубине ~ 100 метров. Перечисленные методы позволяют исследовать лишь небольшие участки поверхности. Однако разработан подход, позволяющий оценивать мощность реголита на больших площадях по данным дистанционных радарных и оптических измерений (Шкуратов и Бондаренко, 2001). Для демонстрации этого оптико-радиолокационного метода используются: (1) данные радиолокационных измерений Томпсона на частоте 430 МГц (длина волны 70 см) [20]; (2) определения содержания радиохромофорных элементов, Fe и Ti (Shkuratov et al., 1999); (3) модель рассеяния радиоволн в реголитовом слое (Shkuratov et al., 1999). На рис. 2.1.24 представлена карта распределения мощности (толщины h) реголитового слоя видимого полушария Луны. Вариации h в морях лежат в пределах 1,5 – 18,0 метров. Сравнительно тонкий слой реголита, ~ 2,0 метра, покрывает некоторые участки поверхности Моря Ясности и Моря Облаков; площадь этих участков небольшая. Мощный реголит, 16 – 18 метров, располагается в районах, прилегающих к некоторым кратерам (кратер Аристилл). Самая низкая средняя мощность реголита оказалась в Море Влажности (4,1 метра), а самая высокая – в Море Нектара (8,5 метра). Для материковых районов характерен более широкий диапазон изменения h , от 1 до 18 метров. Низкие значения соответствуют днищам кратеров и части материковой поверхности около кратера Шиккард. Большие мощности реголита характерны для юго-восточной части лунного диска. Сравнение существующих оценок мощности реголита для мест посадок экспедиций «Аполлон» с нашей картой показывает неплохое согласие.

Содержание гелия-3 в реголите. Изотоп 3He может служить очень эффективным источником энергии. В качестве термоядерного горючего этот изотоп имеет ряд преимуществ в сравнении с обычно используемым в реакторах тритием (3H). Во-первых, тритий сам по себе радиоактивен и, следовательно, опасен. Кроме того, в стандартной схеме реакции синтеза с использованием 3H образуются высокоэнергетичные нейтроны, разрушающие реактор, тогда как в реакциях с 3He присутствуют, в основном, протоны высоких энергий, не дающие такого эффекта.

На Земле гелий распространен, главным образом, в форме 4He . В противоположность этому, в лунном грунте кроме 4He содержится заметное количество изотопа 3He . Его источником служит солнечный ветер, миллиарды лет облучающий поверхность Луны. Гелий солнечного ветра внедряется в поверхностные зоны частиц лунного грунта толщиной несколько сотен ангстрем, частично сохраняясь там. По оценкам Ларри Тейлора [21], в одном кубическом метре морского лунного грунта может содержаться 3He в среднем около 10 мг (для материкового грунта эта величина примерно вдвое меньше). Запасы 3He в слое морского реголита толщиной 3 м площадью 1,5 км² могут обеспечить работу 500 Мвт станции в течение года. Станции, использующие 3He , могли бы обеспечивать лунные базы в течение многих лет практически неограниченным количеством энергии.

В работе (Шкуратов и др., 1999) рассматривается возможность построения карты концентрации ^3He оптическим методом. На первый взгляд такие попытки могут показаться странными: гелий – оптически нейтральное вещество. Оказывается, однако, что концентрация ^3He зависит от содержания такого хромофорного элемента, как титан, количество которого может быть определено оптически. Этот косвенный путь оценки концентрации ^3He (через титан) представляется очень перспективным, благодаря своей простоте и возможностям глобального охвата поверхности Луны оптической съемкой.

Концентрация гелия в лунном грунте зависит от двух факторов: (1) падающего потока солнечного ветра и (2) процессов дегазации грунта. Если концентрацию определяет первый фактор, то ее распределение по лунному диску будет зависеть от широты и долготы точки на Луне. Если содержание гелия контролируется в основном дегазацией, то распределение концентрации будет зависеть от температуры поверхности и концентрации насыщения при данной температуре. Концентрация насыщения связана с составом и структурой материала поверхности.

О количественном соотношении факторов, определяющих распределение гелия по лунной поверхности, можно говорить только предположительно. Однако в пользу дегазации как определяющего фактора можно привести сильный аргумент. Оказывается, что в частицах реголита соотношения концентраций элементов, источником которых является солнечный ветер, не соответствуют отношениям концентраций этих элементов в солнечном ветре. В качестве причины этого указывается различие в скорости дегазации для различных элементов. Содержание атомов элементов с высокими коэффициентами диффузии (H, He) на 1 – 3 порядка ниже, чем можно было бы ожидать, исходя из их доли в солнечном ветре. Это означает, что почти весь гелий покидает частицы грунта, а малая оставшаяся доля определяется способностью реголита удерживать гелий, а не его поступающим количеством.

По типу структурной аккомодации гелий, имплантированный в твердое тело, можно условно разделить на два компонента: сильно и слабо удерживаемый гелий. Сильно удерживаемый гелий должен иметь большую энергию активации диффузии в твердом теле. Такое возможно, если атомы гелия находятся в эффективных ловушках, каковыми могут быть, например, вакансии в кристаллической решетке. Атомы слабо удерживаемого гелия располагаются в межузельном пространстве и могут легко диффундировать в твердом теле. Гелий, найденный в лунных образцах, является, главным образом, сильно удерживаемым. Хорошими ловушками для гелия являются минералы с относительно высокой проводимостью – например, ильменит (FeTiO_3).

Концентрация слабо удерживаемого гелия может быть не всегда мала. При низкой температуре, характерной для высоких широт лунной поверхности, она может быть сравнима с концентрацией сильно удерживаемого гелия. В областях, близких к полюсам, концентрация гелия может не только не убывать, но даже возрастать за счет вклада слабо удерживаемого компонента. Отметим, однако, что слабо удерживаемый гелий должен быть весьма нестабилен при температурных и механических воздействиях на лунный грунт; он будет быстро улетучиваться в случае повышения температуры или при механической переработке (транспортировке) грунта.

Высокая эффективность захвата гелия ильменитом наблюдается экспериментально. В частности, установлена корреляция между содержанием TiO_2 и ^3He в образцах лунного грунта. Эта корреляция оказалась не очень тесной; ее нарушают вариации степени зрелости грунта: чем выше значения I_s/FeO , тем большее количество ^3He внедрено в лунный грунт. Для описания зависимости концентрации ^3He от содержания TiO_2 и степени зрелости реголита было предложено использовать параметр $\text{TiO}_2 \cdot I_s/\text{FeO}$. Корреляция концентрации ^3He с величиной $[\text{TiO}_2 \cdot I_s/\text{FeO}]$, построенная Ларри Тэйлором [21] по данным лабораторных исследований примерно 40 образцов лунного грунта, взятых из разных мест посадок миссий «Аполлон», оказывается довольно тесной (коэффициент корреляции около 0,91). Уравнение регрессии этой зависимости имеет вид: $^3\text{He}[\text{ppb}] = 0,2043 [\text{TiO}_2 \cdot I_s/\text{FeO}]^{0,645}$, где содержание TiO_2 дано в %. Зависимость (25) используется далее как калибровочная (ppb означает part per billion). В работе (Шкуратов и др., 1999) для прогнозирования концентрации ^3He (см. рис. 2.1.25) были использованы распределения TiO_2 и степени зрелости реголита I_s/FeO по видимому полушарию Луны. Светлым тонам на этом изображении соответствует повышенная концентрация ^3He . Карта на рис. 2.1.25 дает представление о содержании ^3He в единице объема реголитового слоя Луны. Однако для того, чтобы оценить запасы этого

изотопа в заданной точке лунной поверхности, необходимо также знать толщину реголитового слоя. Выше рассматривалась задача оценки толщины реголитового слоя Луны по радиолокационным и оптическим данным. Полученную карту мощности можно использовать для совместного анализа с данными о распределении концентрации ^3He . На рис. 2.1.26 приведено изображение, передающее распределение параметра, который является произведением концентрации ^3He на толщину слоя h . Этот параметр характеризует полное содержание ^3He в слое реголита, т.е. это количество ^3He , которое можно добыть из реголита на 1 м² площади лунной поверхности.

Заключение

Лунная тематика развивается в Харьковском университете почти 90 лет. За это время совершенствовались методы оптических исследований лунной поверхности. Если раньше Луна изучалась, как и другие астрофизические объекты, только с помощью телескопов, то сейчас во все большей степени используются данные космических миссий. В нашем коллективе накоплен огромный и уникальный опыт лунных оптических исследований, включая опыт обработки и анализа космических изображений. Развиваются нетрадиционные методы: поляриметрия, изучение фазовых отношений яркости; в этом мы не имеем в мире конкурентов. Все это достигается использованием сравнительно дешевой аппаратуры и малых телескопов. Однако дела с финансированием вузовской науки на Украине обстоят крайне плохо. Из-за материальных проблем мы теряем специалистов, способных вести исследования на мировом уровне, и, как следствие, рискуем потерять эту перспективную, традиционную для Харькова научную тематику.

Литература

- [1] *Belton M., Head J. W., Pieters C. M. et al.* Lunar impact basins and crustal heterogeneity: new western limb and far side data from Galileo // *Science*. – 1992. – 255. – С.570 – 576.
- [2] *Nozette S., Rustan P., Pleasance L., Horan D., et al.* The *Clementine* mission to the Moon: scientific overview // *Science*. – 1994. – V. 266. – P. 1835–1839.
- [3] *Pohn N. and Wildey R.* A photoelectric-photographic study of the normal albedo of the Moon (Map with the Scale 1:5000 000 000), *Geol. Surv. Profess.* – Pap. 1970.
- [4] *Saary, I. M. and Shorthill, R. W.* Isothermal and isophotic atlas of the Moon contour through a lunation, NASA, – 1967.
- [5] *Сытинская Н. Н., Шаронов В. В.* Исследование отражательной способности лунной поверхности // *Учен. записки Ленинград. универ.* – 1952. – №153. – С. 114–154.
- [6] *McEwen, A. S., Eliason, E., Lucey, P., Malaret, E., Pieters, C., Robinson, M., and Sucharski, T.* Summary of radiometric calibration and photometric normalization steps for the *Clementine* UVVIS Images // *Lunar Planet. Sci. Conf. XXIX*. – 1998, Abstract no. 1466.
- [7] *Rougier G.* Photometrie photoelectrique globale de la Lune // *Ann. Obs. Strasburg*. – 1933. – V. 2. – P. 1 – 339.
- [8] *Lane A. P., Irvine W. M.* Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk // *Astron. J.* – 1973. – V. 78, № 3. – P. 267–277.
- [9] *Wildey R. L.* Physical and geological aspects of heiligenschein measurements // *Apollo 16 Prelim. Sci. Rep. NASA SP-315*. Washington. – 1972. – P. (29)113 – (29)119.
- [10] *Buratti B. J., Hillier J. K., Wang M.* The lunar opposition surge: observation by *Clementine* // *Icarus* – 1996. – V. 124. – С.490–499.
- [11] *McCord T. B.* Color differences on the lunar surface // *J. Geophys. Res.* – 1969. – V. 74. No 12. – P. 3131 – 3142.
- [12] *Pieters C., McCord T.* Characterization of lunar mare basalt types // *Proc. Lunar Sci. Conf. 7th, LPI Houston*. – 1976. – P.2677–2690.
- [13] *Whitaker E.* Lunar color boundaries and their relationship to topographic features // *The Moon*. – 1972. – V. 4. – P.348 – 355.
- [14] *Charette M., McCord T.B., Pieters C., Adams J.B.* Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium content of lunar soils // *J. Geophys. Res.* – 1974. – V. 79. – P.1605–1613.

- [15] *Араго Д. Ф.* Поляризация света Луны // Общепонятная астрономия. – 1861. – Т. 3. – С. 319 – 320.
- [16] *Seccki A.* Note in the recent occultation of Saturn by the Moon, and on experiments for ascertaining the polarization of the Moon's light // Month. Not. Roy. Astron. Soc. – 1859. – V. 8. – P. 289 – 290.
- [17] *Lyot B.* Recherches sur la polarisation de la lumiere des planetes et de quelques substances terrestres // Ann. Obs. Meudon. – 1929. – V. 8, No 1. – P. 1-161.
- [18] *Dollfus A., Bowell E.* Polarimetric properties of the lunar surface and interpretation. I. Telescope observation // Astron. Astrophys. – 1971. – V. 10. – P. 29 – 53.
- [19] *Lucey P., Taylor G., Malaret E.* Abundance and distribution of iron on the Moon // Science. – 1995. – 268. – P.1150–1153.
- [20] *Thompson T. W.* High-resolution lunar radar at 70-cm wavelength // Earth Moon Planets – 1987. – 37. – P.59–70.
- [21] *Taylor L.* Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances // Eng. Constr. Oper. in Space IV, ASCE Publ., Proc. of Space' 94. –1994. – P. 678–686.