

200 ЛЕТ АСТРОНОМИИ В ХАРЬКОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Под редакцией проф. Ю. Г. Шкуратова

ГЛАВА 2 НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ХАРЬКОВСКИХ АСТРОНОМОВ

Харьков – 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА	
1. ИСТОРИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ И КАФЕДРЫ АСТРОНОМИИ	
1.1. Астрономы и Астрономическая обсерватория Харьковского университета от 1808 по 1842 год. <i>Г. В. Левицкий</i>	
1.2. Астрономы и Астрономическая обсерватория Харьковского университета от 1843 по 1879 год. <i>Г. В. Левицкий</i>	
1.3. Кафедра астрономии. <i>Н. Н. Евдокимов</i>	
1.4. Современный очерк истории астрономии в Харьковском университете. <i>Ю. В. Александров, Ю. Г. Шкуратов</i>	
1.5. Астрономы Харьковского университета в годы Великой Отечественной войны. <i>Ю. В. Александров</i>	
1.6. Из истории Харьковской обсерватории: биографические очерки. <i>М. А. Балышев</i>	
1.7. Бастион науки. <i>Ю. В. Корниенко</i>	
1.8. «Барабашов был под стать Антониади, Скиапарелли, – ему дай Марс живой». <i>И. Б. Вавилова</i>	
1.9. Планетная научная школа академика Н. П. Барабашова. <i>И. Б. Вавилова</i>	
1.10. О библиотеке НИИ астрономии. <i>Т. Н. Мандрыка</i>	
Приложение 1. Список преподавателей астрономии Харьковского университета	
Приложение 2. Диссертации по астрономии, подготовленные в Харьковском университете	
Приложение 3. Астрономы Харьковского университета, в честь которых названы объекты в Солнечной системе	
Приложение 4. Астрономы – почетные члены (доктора) Харьковского университета	
Приложение 5. Список заведующих кафедрой астрономии и директоров астрономической обсерватории Харьковского университета.....	

Текст: http://www.astron.kharkov.ua/library/books/200_years_p1.pdf

Иллюстрации: http://www.astron.kharkov.ua/library/books/200_years_p1_figs.pdf

2. НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ХАРЬКОВСКИХ АСТРОНОМОВ

- 2.1. Исследования Луны. *Ю. Г. Шкуратов, Н. В. Опанасенко, В. Г. Кайдаш, В. В. Корохин*
- 2.2. Малые тела Солнечной системы. *Д. Ф. Лупишко, И. Н. Бельская, Н. Н. Киселев*
- 2.3. Наземные наблюдения Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна. *Ю. В. Александров* .
- 2.4. Поляриметрия полярных областей Юпитера. *В. В. Корохин, О. С. Шалыгина*
- 2.5. Обработка и анализ данных космических миссий к Марсу и Венере. *М. А. Креславский, Ю. Г. Шкуратов*
- 2.6. Рассеяние света поверхностями сложной структуры. *Ю. Г. Шкуратов, Д. В. Петров, Д. Г. Станкевич, Е. С. Зубко, Е. С. Гринько*
- 2.7. Лабораторное моделирование светорассеяния реголитовыми поверхностями. *Ю. Г. Шкуратов, В. А. Псарев, А. А. Овчаренко*
- 2.8. Процессы на поверхностях безатмосферных небесных тел. *Л. В. Старухина*
- 2.9. История и результаты исследований Солнца. *Л. А. Акимов, И. Л. Белкина, Н. П. Дятел, Г. П. Марченко*
- 2.10. Астрометрия в XX веке. *П. Н. Федоров*
- 2.11. Получение предельно высокого пространственного разрешения астрономических изображений. *В. Н. Дудинов, В. С. Цветкова, В. Г. Вакулик, А. А. Минаков*
- 2.12. Проблема углового разрешения при наблюдении астрономических объектов сквозь атмосферу. *Ю. В. Корниенко*
- 2.13. Астрофизические и звездноастрономические исследования. *В. А. Захожай*

Текст: http://www.astron.kharkov.ua/library/books/200_years_p2.pdf

Иллюстрации: http://www.astron.kharkov.ua/library/books/200_years_p1_figs.pdf

3. БИБЛИОГРАФИЯ РАБОТ ЗА 200 ЛЕТ

Текст: http://www.astron.kharkov.ua/library/books/200_years_p3.pdf

2. НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ХАРЬКОВСКИХ АСТРОНОМОВ

*Доводы, до которых человек
додумывается сам, обычно
убеждают его больше, нежели те,
которые пришли в голову другим.*

Блез Паскаль

В этой части представлен широкий спектр научных достижений сотрудников НИИ астрономии, от исследований Луны до внегалактической астрономии. Это в полной мере отражает разнообразие научных тем, выполняемых в нашем институте в разное время. Статьи написаны ведущими специалистами; как правило, содержат исторические факты. Однако эти статьи едва ли можно считать полным введением в соответствующую проблему. Их задача показать роль харьковских астрономов при решении той или иной научной задачи. Иногда в статьях присутствует неформальное описание некоторых событий; это рассматривалось как достоинство и считалось вполне уместным для такой книги. В каждой статье имеются ссылки, причем ссылки в круглых скобках (фамилия и год) соответствуют работам наших сотрудников; их следует искать в третьей части этой книги, где дана полная библиография работ за 200 лет. В квадратных скобках даны ссылки на работы других авторов. Эти работы приводятся списком в конце каждой статьи.

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 $70 - 80^\circ$, 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 непростая задача, 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 (Shkurov 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, Shkurov 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 (Orapasenkov 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 – альбеда 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 альбедо, 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 $\alpha_{\max}$ (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 $\alpha_{\max}$.

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.

2.2. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

д.ф.-м.н. Д. Ф. Лупишко, д.ф.-м.н. И. Н. Бельская, д.ф.-м.н. Н. Н. Киселев

Введение

В середине 1970-х годов физические исследования астероидов уже шли полным ходом в США и постепенно начинали проводиться в Европе (Италия, Австрия, Швеция). Становилось очевидным, что астероиды, как и кометы – тела особого интереса и их изучение крайне необходимо, прежде всего, с точки зрения решения космогонических проблем Солнечной системы. Именно это и послужило основным мотивом для начала астрофизических исследований пояса астероидов в НИИ астрономии (тогда – Астрономическая обсерватория Харьковского госуниверситета, АО ХГУ).

В те годы наша обсерватория вела активное сотрудничество с Институтом астрофизики АН Таджикской ССР (Душанбе) в исследованиях Марса в великое (1971 г.) и в последующие близперигелийные противостояния. Такое сотрудничество стало возможным благодаря договоренности между директорами этих учреждений академиками Н. П. Барабашовым и П. Б. Бабаджановым, а осуществлялось непосредственно сотрудниками Д. Ф. Лупишко (АО ХГУ) и Н. Н. Киселевым (в то время – Институт астрофизики). По нашей инициативе в 1977 году эти два учреждения Советского Союза, понимая важность и возрастающую необходимость физических исследований астероидов, решили объединить свои усилия и начать совместные систематические работы по фотометрии и поляриметрии астероидов. Сотрудничество было оформлено договором, опирающимся на использование благоприятного астроклимата в Средней Азии, имеющейся аппаратуры и опыта фотоэлектрических наблюдений слабых объектов (звезд, комет) в Институте астрофизики, с одной стороны, и накопленного в АО ХГУ опыта планетных исследований, с другой.

Совместные наблюдения астероидов в рамках договора были начаты летом 1977 г. на 70-см рефлекторе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории Ин-та астрофизики в фотометрической системе UBV с использованием одноканального фотометра, работающего в режиме счета фотонов. Первоначально наблюдения были ориентированы на изучение фазовых зависимостей блеска и цвета астероидов в максимально доступном для наблюдений с Земли диапазоне фазовых углов, а также на изучение параметров вращения и формы астероидов по их кривым блеска. Эти направления исследований остаются весьма актуальными и сегодня. Хочется отметить, что первая публикация начавшихся исследований называлась «Оппозиционный эффект малой планеты 17 Фетида» (Лупишко и др., 1979), то есть была посвящена проблеме, которая очень активно разрабатывается в настоящее время, причем НИИ астрономии является в этом направлении одним из лидеров.

В работе принимали участие сотрудники Института астрофизики Киселев Н. Н., Чернова Г. П., Тупиева Ф. А. и сотрудники АО ХГУ Лупишко Д. Ф., Бельская И. Н., Величко Ф. П. Этой группой было опубликовано около полутора десятка статей по фотометрии астероидов главного пояса (см. Библиографию), которые содержат кривые блеска и фазовые зависимости блеска и цвета астероидов; измеренные амплитуды оппозиционных эффектов; оценки альбеда, диаметров и вытянутости формы; скорость, направление вращения и ориентацию осей вращения астероидов в пространстве.

Параллельно с наблюдениями в ГисАО, Величко Ф. П. и Шевченко В. Г. в 1983 – 1985 г.г. начали регулярные фотометрические наблюдения астероидов на Чугуевской наблюдательной станции АО ХГУ с использованием такого же 70-см рефлектора АЗТ-8, как и в Душанбе, и аналогичного электрофотометра АФМ-6. Проведение согласованных наблюдений в двух местах значительно повышало эффективность наших исследований. Кроме того, в это же время были начаты поляриметрические наблюдения астероидов, которые осуществлялись в тесном сотрудничестве трех обсерваторий – АО ХГУ, Ин-та астрофизики

в Душанбе и Крымской астрофизической обсерватории (Шаховской Н. М. и Ефимов Ю. С.). В Крыму использовались 1,25 м рефлектор АЗТ-11 и пятицветный UBVR_I-поляриметр, что позволило начать программу изучения спектральной зависимости параметров поляризации астероидов. В 1992 г. сотрудниками АО ХГУ (Круглый Ю. Н. и др.) начаты фотоэлектрические наблюдения астероидов на 60-см и 1-м телескопах на горе Кошка в Симеизе, а с 1996 г. – с ПЗС-камерой ST-6, которые выполняются в рамках сотрудничества с КрАО (Гафтонюк Н. М.).

С введением в строй 1 м телескопа Цейсса обсерватории Санглок Ин-та астрофизики Тадж. ССР наблюдения астероидов по совместным программам стали проводиться и на Санглоке (с 1984 г. – поляриметрия и с 1989 г. – фотометрия). Однако из-за распада Советского Союза наше сотрудничество с таджикскими коллегами, к сожалению, в 1991 – 1992 г.г. прекратилось. Стоит отметить также такой печальный факт, что из-за военных действий в то время в районе обсерватории Санглок 1 м телескоп прекратил свое функционирование.

Постепенно складывалось сотрудничество с зарубежными коллегами США и Европы. В 1995 г. в рамках договора о сотрудничестве с Институтом планетных исследований в Берлине (DLR, Германия) была получена ПЗС-камера ST-6 UV вместе с программным обеспечением. Внедрение ее в практику фотометрических наблюдений астероидов на Чугуевской наблюдательной станции АО ХГУ существенно повысило наши наблюдательные возможности. В настоящее время кроме этой камеры для фотометрии астероидов и комет используются также камера IMG 1024S (американская фирма FLI), полученная в 2001 г. в качестве гранта Американского Планетного Общества, и камера FLI 47-10, приобретенная в 2006 г. вместе с приемником GPS по INTAS-гранту.

Научные интересы нашей группы не ограничивались только объектами главного пояса, а постепенно все больше и больше охватывали астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). Этому способствовало в значительной мере не только их периодические тесные сближения с Землей (а значит, возможность наблюдения очень малых астероидов, причем в широком диапазоне фазовых углов), но и растущее понимание во всем мире реальности астероидно-кометной опасности и перспектив освоения астероидов как источника металлов и другого минерального сырья в околоземном космическом пространстве. С приходом в группу 1988 г. выпускника нашего университета Круглого Ю. Н. (работавшего до этого по распределению в Физико-техническом институте АН Туркменской ССР) фотометрические исследования АСЗ значительно активизировались. Кроме того, в январе 1995 г. в состав нашего отдела был зачислен Н. Н. Киселев – сотрудник Ин-та астрофизики Таджикской ССР, известный уже в то время специалист по фотометрии и поляриметрии комет, который три последних года работал с доктором К. Йокерсом в Институте исследования тел Солнечной системы им. Макса Планка в Германии. С этого времени исследования комет прочно вошли в научную тематику нашего отдела, который официально начал свою историю с 1993 г. как отдел физики астероидов (сейчас – отдел физики астероидов и комет).

Обнаружение и изучение тел пояса Койпера в последние годы становится все более и более актуальным, поскольку понимание природы этой новой популяции объектов непосредственно связано с пониманием происхождения комет и их связи с астероидами, с определением структуры и эволюции Солнечной системы, ее границ и др. Эта тематика, которую успешно ведет И. Н. Бельская в сотрудничестве с зарубежными коллегами, в последние 2-3 года тоже нашла свое место в наших исследованиях.

Подводя итог краткого исторического экскурса, стоит отметить, что становление тематики исследований астероидов в АО ХГУ (как и в целом в стране) не было простым. Во-первых, это довольно слабые объекты для тех телескопов, на которых мы могли наблюдать астероиды, а во-вторых, не было необходимой зарубежной литературы, где публиковались результаты их исследований, и не было специалистов, занимающихся непосредственно исследованиями физики астероидов. По этой причине много усилий было затрачено на организационную деятельность, направленную на инициирование исследований астероидов в других обсерваториях СССР. Так, в 1981 г. и в 1983 г. в АО ХГУ было проведено два Всесоюзных семинар-совещания по физическим исследованиям астероидов, в которых участвовали 19 человек (9 учреждений) и 28 человек (14 учреждений), соответственно. В 1984 г. решением секции «Солнечная система» Астросовета АН СССР была организована новая постоянно действующая Рабочая группа «Астероиды» с определением в качестве координирующей организации АО ХГУ (председатель РГ – Д. Ф. Лупишко, ученый секретарь

– И. Н. Бельская). Рабочая группа, в состав которой входило 22 человека, представляющих 14 астрономических учреждений страны, координировала исследования по данной тематике. Она просуществовала почти 10 лет и была распущена в связи с распадом Советского Союза и ликвидацией Астросовета. За это время было проведено пять заседаний РГ на базе тех учреждений, где исследования астероидов уже проводились или только зарождались – в Харькове, Душанбе, Баку, Киеве и Одессе. В июне 1994 г. в АО ХГУ проходила конференция по физике Луны и планет, посвященная 100-летию со дня рождения академика Н. П. Барабашова, в которой приняли участие около половины членов РГ «Астероиды». Тогда и было принято решение о самороспуске РГ.

Однако исследования малых тел Солнечной системы в НИИ астрономии ХНУ успешно продолжаются. В данном обзоре кратко описаны наиболее важные результаты, полученные на протяжении их относительно короткой 30-летней истории.

Астероиды

Как уже упоминалось, началом наших исследований астероидов были фотометрические наблюдения. Фотометрия – это один из наиболее эффективных методов исследований, который обеспечил огромный объем данных об альбедо и размерах, форме и вращении, оптических и структурных свойствах астероидов и других малых тел Солнечной системы. Вклад фотометрического метода является решающим в таких направлениях, как определение формы и параметров вращения астероидов, изучение оптических свойств их поверхностей, в обнаружение и изучение двойных систем среди астероидов. До начала радарных наблюдений фотометрия была единственной возможностью для изучения формы и осевого вращения астероидов, основанной на наблюдениях их кривых блеска, то есть вариаций блеска астероидов, связанных с их осевым вращением.

На рис. 2.2.1 и 2.2.2 приведены результаты UBV-фотометрии крупнейшего астероида М-типа 16 Психея в две оппозиции (Lupishko and Belskaya, 1983). Как видно из рис. 2.2.1, в 1978 г. амплитуда кривой блеска астероида была практически нулевой, в то время как в 1979 г. она составляла 0,32 зв. вел. Это означает, что в 1978 г. астероид наблюдался со стороны полюса, то есть в направлении его оси вращения, и координаты полюса астероида были близкими к координатам самого астероида в этот момент. Поскольку эклиптические долготы Психеи в эти две оппозиции отличались почти ровно на 90° , то в 1979 г. астероид наблюдался со стороны экватора (угол аспекта равен примерно 90°), амплитуда кривой блеска его была максимальной и соответствующей соотношению полуосей $a:b=1,34$. Кроме того, в 1978 г. при видимости со стороны полюса астероид был ярче примерно на 0,4 зв. вел. (см. рис. 2.2.2). Это означает, что в 1978 году наблюдалось большее поперечное сечение астероида, чем в 1979 году. С одной стороны, различие в звездных величинах при этих двух аспектах (со стороны полюса и со стороны экватора) дает соотношение полуосей $b:c$, а с другой – максимальный блеск астероида со стороны полюса указывает на то, что астероид вращается вокруг наименьшей оси c , сохраняя максимальным момент инерции и минимальной энергию вращения (Lupishko and Belskaya, 1983). Сейчас мы знаем, что так вращается подавляющее большинство астероидов (так называемое «principal axis rotation»), однако 30 лет назад это было не столь очевидным, и одно из первых подтверждений такого вращения было получено нами по данным фотометрии.

Кривые блеска конкретного астероида, полученные при разных эклиптических долготах, содержат очень ценную информацию о его векторе вращения (то есть о скорости, направлении вращения и ориентации оси вращения в пространстве), о форме астероида, распределении альбедо по поверхности и даже об оптических свойствах самой поверхности. Методы определения этих параметров подробно описаны в кандидатских диссертациях Ф. П. Величко (1991) и аспирантки из Монголии Тунгалаг Намхай (Тунгалаг, 2003), и частично в обзоре (Лупишко и др., 2007). Отметим, что Ф. П. Величко в свое время внес существенный вклад в разработку методов определения параметров вращения и формы астероидов на основе анализа их кривых блеска (Е-метод для АСЗ и ЕАМ-метод для астероида главного пояса 354 Элеонора, см. (Лупишко и др., 1981, Lupishko and Velichko, 1990)). Недавно В. Г. Шевченко и Н. Тунгалаг предложили новую версию комбинированного метода определения параметров вращения и формы астероидов с использованием фазовой функции Шевченко (19976) и закона рассеивания света Акимова (1988) как наиболее соответствующих рассеивающим свойствам поверхностей астероидов. Этим

методом были определены координаты полюсов, параметры вращения и форма 39 астероидов, из них для 21 – впервые (Тунгалаг и др., 2002, 2003). В последние годы фотометрические наблюдения астероидов главного пояса с целью определения их периодов вращения и формы активно проводит В. Г. Черный, который пришел в наш отдел в 1991 г.

В настоящее время число астероидов с известными периодами вращения составляет около 2000, а с определенными координатами полюсов, сидерическими периодами, направлением вращения и соотношениями полуосей превышает 200. Вклад Харьковской астероидной группы составляет около 10% в определение периодов вращения и около 20 % – в определение вектора вращения и соотношения полуосей астероидов. Все эти данные представляются очень ценными как для изучения индивидуальных астероидов, так и для выполнения статистического анализа по изучению вращения и формы астероидов в целом. В частности, анализ пространственного распределения полюсов астероидов показал (рис. 2.2.3), что анизотропия в распределении широты полюсов имеет место только для объектов с прямым вращением ($\sin\beta_0 > 0$, где β_0 – эклиптическая широта полюса), а для астероидов с обратным вращением распределение почти изотропное. При этом степень анизотропии возрастает с размером астероидов (Тунгалаг и др., 2003). Отношение числа астероидов с прямым и обратным вращением возрастает с их диаметром от 1:1 среди малых астероидов ($D < 50$ км) до примерно 1,5:1 среди промежуточных размеров ($50 < D < 125$ км) и до около 2:1 среди больших ($D > 125$ км). Таким образом, среди малых астероидов направление вращения является равновероятным, а для крупных тел преобладает изначальное прямое. Эти выводы имеют космогонический характер и свидетельствуют в пользу интенсивной столкновительной эволюции в поясе астероидов в постаккреционный период.

Изучение фазовых зависимостей блеска и цвета астероидов и их оппозиционного эффекта – одна из основных программ исследований астероидов в НИИ астрономии (Шевченко, 1997б, Belskaya et al., 2003, Shevchenko et al., 1997, Shevchenko et al., 2002). Для аппроксимации фазовых зависимостей блеска обычно использовались HG-функция, а также функции Хапке и Люмме-Боуэлла. Однако в силу ряда ограничений их применение было связано с рядом трудностей и не всегда приводило к адекватному описанию этих зависимостей. В своей диссертационной работе В. Г. Шевченко (1997а) предложил новую эмпирическую функцию, которая с точностью до ошибок наблюдений аппроксимирует поведение блеска в диапазоне фазовых углов $\alpha = 0 \div 40^\circ$ и гораздо лучше описывает область оппозиционного эффекта по сравнению с наиболее часто применяемой HG-функцией. Она имеет следующий вид:

$$V(1, \alpha) = V_0 - \frac{a}{1 + \alpha} + b\alpha, \quad (1)$$

где: V_0 – звездная величина астероида при $\alpha=0$ на единичном расстоянии от Земли и Солнца за вычетом величины оппозиционного эффекта; a – параметр, характеризующий амплитуду ОЭ; b – параметр, характеризующий линейный участок фазовой зависимости. Эти три неизвестные легко определяются методом наименьших квадратов. Следует отметить, что второе слагаемое зависимости (1) описывает только оппозиционный эффект, и его вклад на линейном участке не превышает нескольких процентов. Третье слагаемое соответствует обычному выражению для линейного участка с фазовым коэффициентом β .

На рис. 2.2.4 приведена зависимость фазового коэффициента β от геометрического альbedo астероидов p_v , полученная в работе (Belskaya and Shevchenko, 2000). Если альbedo представить в логарифмической шкале, то эта зависимость принимает линейный вид:

$$\beta = -0,026 \lg p_v + 0,011. \quad (2)$$

Обратная зависимость фазового коэффициента (т.е. наклона фазовой зависимости блеска) от альbedo обусловлена тем, что с уменьшением последнего увеличивается поглощательная способность частиц поверхности, а также возрастает роль взаимных затенений между частицами/элементами поверхности, вследствие чего наблюдается более быстрый спад блеска астероида с возрастанием фазового угла. Эта зависимость представляется очень важной, поскольку дает возможность оценивать альbedo астероида (а, значит, грубо и его тип) по одним только фотометрическим измерениям.

Анализируя все имеющиеся данные по ОЭ астероидов, полученные в основном Харьковской астероидной группой, Бельская и Шевченко (Belskaya and Shevchenko, 2000)

показали, что в отличие от фазового коэффициента амплитуда оппозиционного эффекта (ОЭ) имеет более сложную зависимость от альбеда (рис. 2.2.5). Максимальную амплитуду ($0,27 \pm 0,42$ зв. вел.) имеют среднеальбедные астероиды S и M-типов, минимальную – низкоальбедные C, G, P и F-астероиды. Кроме того, низкоальбедные астероиды демонстрируют большое разнообразие величины (от 0,05 до 0,23 зв. вел.) и формы ОЭ. В целом, амплитуда оппозиционного эффекта зависит от альбеда неоднозначно и имеет максимум при альбеде $p_v = 0,20$. Таким образом, астероиды разных таксономических классов имеют разную величину и форму ОЭ, и это является важным результатом для понимания механизмов формирования ОЭ и для изучения различий в структуре и составе астероидных поверхностей. В настоящее время известны два механизма формирования ОЭ – это когерентное усиление обратного рассеяния света и теневой эффект. Их относительный вклад разный для разных типов объектов: для низкоальбедных преобладает теневой эффект, а для высокоальбедных (E-тип) – когерентное усиление обратного рассеяния. В то же время, для среднеальбедных объектов оба механизма существенны, и, возможно, по этой причине они показывают наибольшую амплитуду ОЭ.

Таким образом, изучение фазовых зависимостей блеска и оппозиционных эффектов необходимо, прежде всего, для понимания процессов рассеивания света реголитами безатмосферных космических тел. Кроме того, фазовые зависимости и величины ОЭ необходимы для вычисления абсолютных звездных величин этих объектов, которые, с одной стороны, являются основой для определения их альбеда и диаметров, а с другой – основой для эфемеридных вычислений видимого блеска.

Для решения многих задач необходимо иметь фотометрическую модель астероида, которая учитывает форму тела, наиболее близкую к реальной, распределение яркости по поверхности и фазовую функцию. Такая модель была создана и постоянно улучшается В. Г. Шевченко (1997а). Она предусматривает произвольную форму тела, в том числе и невыпуклую; произвольное распределение альбеда по поверхности; произвольные закон рассеивания света поверхностью и фазовую функцию. Модель дает возможность получать кривые блеска астероидов произвольной формы для любого угла аспекта и вычислять их блеск в наблюдаемом диапазоне фазовых углов. Она использовалась для проверки различных законов рассеяния света с целью определения наиболее соответствующего реальному распределению яркости по поверхности астероидов (Акимов и др., 1992). Она также широко применяется для определения координат полюсов, формы астероидов, обычно аппроксимируемой трехосным эллипсоидом с полуосями $a > b > c$ (Тунгалаг и др., 2002; 2003).

Важным направлением в настоящее время является обнаружение и изучение двойных систем среди астероидов и объектов пояса Койпера. Вслед за открытием первого спутника Дактиль у астероида главного пояса 243 Ида, сделанного по прямым изображениям с КА «Галилео» в 1993 году, последующие открытия двойных астероидов начались уже в 1994 – 1995 г.г., причем фотометрическим методом с помощью наземных телескопов. В настоящее время обнаружение двойных систем выполняется с использованием адаптивной оптики на крупных наземных телескопах, радарным методом, получением прямых изображений с помощью космического телескопа Хаббла и фотометрическим методом, то есть в результате анализа кривых блеска объекта. В качестве примера использования фотометрии можно привести обнаружение двойственности у малого астероида главного пояса 11264 Клаудиомаконе (Krugly et al., 2007). Наблюдения его были проведены в течение 9 ночей на Чугуевской наблюдательной станции и в КрАО (г. Симеиз). Полученные индивидуальные кривые блеска указывали на возможную 3-х часовую периодичность блеска, однако они имели нерегулярную форму с дополнительными минимумами, депрессиями и др. аномальными ослаблениями блеска. Было предположено, что эти особенности обусловлены возможной двойственностью астероида. Используя части кривых блеска без нерегулярных депрессий и ослаблений блеска, удалось получить по всей совокупности данных короткопериодическую кривую блеска. После ее вычитания из наблюдений остаточные вариации хорошо согласовались с периодом $P_2 = 15,11$ часа и дали долгопериодическую кривую вариаций блеска, которая выглядит подобно кривой на рис. 2.2.7 (см. стр. 217) и действительно указывает на двойственность этого астероида. Анализ обеих кривых позволяет оценить основные параметры системы: период вращения первичного тела $P_1 = 3,1872 \pm 0,0006$ часа, орбитальный период вторичного тела $P_{orb} = 15,11 \pm 0,01$ часа, отношение диаметров тел $d_1/d_2 \geq 0,31$, отношение радиуса орбиты к диаметру первичного тела $r_{orb}/d_1 = 1,5 \pm 0,2$, объемная плотность первичного тела $\rho_p \geq 1,2$ г/см³. Кроме того, на основе измеренного пока-

зателя цвета V–R определен тип астероида, и по его среднему альбедо определены эффективный диаметр астероида (4,2 км) и диаметры компонент (4,0 и 1,24 км) (Krugly et al., 2007).

Как было показано в работе (Лупишко и др., 2007), параметры обнаруженных 28 двойных систем среди AC3 подобны между собой (что может указывать на то, что системы с такими параметрами динамически наиболее стабильны или же это свидетельство в пользу одного и того же механизма их происхождения). В то же время, среди астероидов главного пояса наблюдается большое разнообразие двойных систем. Так, размер Дактиля составляет всего 1.4 км при размере первичного тела 243 Ида – 60×25×19 км. Совсем другой пример – двойная система 90 Антиопа, открытая в 2000 г., представляет два одинаковых по размерам компонента диаметром $D = 85$ км, удаленных друг от друга на расстояние $2D$. Фотометрические наблюдения этой системы в течение нескольких оппозиций в рамках сотрудничества с доктором Т. Михаловским (Познаньская обсерватория, Польша) провел Ф. П. Величко. Полученные данные позволили существенно уточнить параметры двойной системы и определить координаты ее полюса: $\lambda_0 = 17 \pm 5^\circ$ и $\beta_0 = 25 \pm 5^\circ$ (Michalowski et al., 2004).

Астероиды групп Амура, Аполлона и Атона, т.е., астероиды, сближающиеся с Землей (AC3), представляли для нас интерес с самого начала наших исследований, а в последние 12–15 лет фотометрия AC3 стала одной из основных наших программ. Эти объекты, как известно, периодически тесно сближаются с Землей и поэтому имеют быстрое угловое перемещение по небу, вследствие чего представляют определенную сложность для точной фотометрии. Ю. Н. Круглый как основной исполнитель программы провел анализ точности фотометрических измерений быстро движущихся астероидов на ПЗС-снимках, разработал методику наблюдений и редукции ПЗС-снимков таких объектов и создал необходимое программное обеспечение (Krugly et al., 2002, Круглый, 2003, 2004). К настоящему времени получено более 500 кривых блеска примерно 130 AC3, на основе которых получены новые данные о размерах, форме, периодах осевого вращения и оптических свойствах поверхностей нескольких десятков AC3. Измерены периоды вращения около 80 AC3, причем для 50 из них – впервые. Определены фотометрические диаметры около 65 AC3. Несколько объектов наблюдались в широком диапазоне углов аспекта и фаз в рамках международного сотрудничества, что позволило построить физические модели шести из них (Magnusson et al., 1996, Mottola et al., 1997, Kaasalainen et al., 2004). Для трех AC3 получены фазовые зависимости блеска до предельно малых углов фаз (меньше 1°). В частности, фазовая кривая блеска AC3 433 Эрос, полученная Ю. Н. Круглым и В. Г. Шевченко в диапазоне фазовых углов $\alpha = 0,3\div 31^\circ$ (Krugly and Shevchenko, 1999), была использована коллегами США для калибровки результатов измерений с борта КА миссии NEAR-Shoemaker к Эросу. В целом, научные проблемы изучения AC3 остаются теми же, что и для астероидов главного пояса, но дополняются также астрометрическими наблюдениями, необходимыми для уточнения орбит вновь открытых AC3. Такие наблюдения были начаты нами в рамках Европейской программы обнаружения опасных AC3 *EUNEASO*, направленной на решение проблемы «Астероидная опасность».

Результаты исследований по этой программе опубликованы во многих статьях совместно с зарубежными коллегами и послужили основой кандидатской диссертации Ю. Н. Круглого (2004). Среди них стоит отметить результаты фотометрии астероида группы Аполлона 4179 Тоутатис ($D \sim 3$ км) в период его тесного сближения с Землей в 1992 – 1993 г.г. Работа выполнялась в рамках международной программы с участием 26 обсерваторий. Была получена фазовая зависимость блеска Тоутатиса в диапазоне фазовых углов $\alpha = 0,3\div 33^\circ$ и кривая вариаций его блеска с периодом 176 час и амплитудой 1,15 зв. вел. (Круглый и др., 1993, Spencer et al., 1995). Совместный анализ радарных и фотометрических данных показал, что астероид имеет очень сложное вращение, причем не вокруг самой короткой оси (non-principal axis rotation). Сейчас известно около 12 других астероидов, сближающихся с Землей, с таким вращением, их обычно называют «tumbling asteroids». Таким образом, в отличие от Психеи (см. выше) Тоутатис представляет собой совершенно другой пример астероидного вращения: сейчас уже хорошо известно, что он вращается вокруг самой длинной оси с периодом 129,8 часа, которая прецессирует с периодом 176,4 часа. Как заметили наши американские коллеги, Харьковская группа получила наиболее точное значение этого периода (Spencer et al., 1995).

На рис. 2.2.6 представлена диаграмма зависимости периодов вращения AC3 от их абсолютных звездных величин, построенная Ю. Н. Круглым (2003) и обновленная по последним данным. Она указывает на существование некоторого предела вращения или

«барьера» для скоростей выше, чем 11 об/сутки. Более четко этот барьер был показан в работе [1] на диаграмме, включающей не только АСЗ, но и астероиды главного пояса, такие как «rubble pile spin barrier». Он подразумевает, что при такой скорости вращения центробежная сила на экваторе тела становится равной силе гравитационного притяжения для почти сферического тела типа «rubble piles» (груда камней) с ожидаемой для астероидов плотностью $2 \div 3 \text{ г/см}^3$. Существование этого барьера предполагает, что даже такие малые астероиды могут иметь структуру груды камней без существенных сил сцепления. Диаграмма (рис. 2.2.6) указывает также на существование еще одного критического предела, соответствующего абсолютной звездной величине $H = 21,5$, которая при среднем альбедо АСЗ, полученном при учете эффектов наблюдательной селекции $p_v = 0,14 \pm 0,02$ [2], соответствует диаметру тела $D = 180 \text{ м}$. Тела, меньше этого размера, выдерживают очень быстрое вращение, то есть они являются монолитными телами с большими силами внутреннего сцепления. Таким образом, можно утверждать, что область, где существуют слабо консолидированные тела со структурой типа «rubble piles», на диаграмме «период вращения – диаметр» лежит в области $P \geq 2,2 \text{ часа}$ и $D \geq 180 \text{ м}$.

С 1993 года фотометрия АСЗ в нашем отделе ведется в рамках Договора о сотрудничестве с Крымской астрофизической обсерваторией, где эту работу выполняет на 1-м рефлекторе Цейсса (Симеиз) выпускница ХГУ Гафтонюк Н. М. С 2000 года она проводит регулярные ПЗС-наблюдения АСЗ по согласованной с Ю. Н. Круглым программе, и в 2006 году защитила кандидатскую диссертацию [3]. С 1995 г. Ю. Н. Круглый активно сотрудничает в фотометрии АСЗ с П. Правецом (Чехия, Онджеевская обсерватория). Совместные наблюдения кривых блеска АСЗ дали им возможность обнаружить и исследовать несколько двойных астероидов среди объектов этой популяции. На рис. 2.2.7 в качестве примера приведена долгопериодическая компонента кривой блеска АСЗ 1996 FG3, полученная с участием сотрудников отдела Ю. Круглого, Ф. Величко, В. Шевченко и В. Черного, которая четко указывает на двойственность этого астероида.

В вопросе о происхождении АСЗ в настоящее время нет особых разногласий. Считается, и не без оснований, что основной источник пополнения этих тел – это астероиды главного пояса. Некоторые расхождения имеют место лишь в оценке доли АСЗ кометного происхождения (ядра комет, исчерпавших свою активность). Всего 15 лет назад диапазон оценок этой доли включал весь спектр возможных значений – от большинства АСЗ, как утверждал Е. Эпик в 1963 г., до 40% (Дж. Везерилл в 1988 г. и Р. Бинзел в 1992 г.), и вплоть до нуля («... если кометные ядра и встречаются среди АСЗ, то крайне редко», – Э. Тедеско и Дж. Градье в 1988 г.). Однако новые оценки, появившиеся в 2001 г. и позже, гораздо лучше согласуются между собой. Лупишко Д. Ф. и Лупишко Т. А. (2001) провели сравнительный анализ физических свойств и минералогии АСЗ, астероидов главного пояса и, частично, ядер комет и пришли к выводу, что главный пояс астероидов является доминирующим источником пополнения АСЗ-популяции, а доля АСЗ кометного происхождения не превышает 10%. Этот вывод хорошо согласуется с последними оценками, диапазон которых заключен в пределах $5 \div 15 \%$ (более подробно вместе со ссылками см. в обзоре Lupishko et al., 2007) и не противоречит динамическим соображениям, согласно которым главный пояс астероидов в состоянии пополнять популяцию АСЗ несколькими сотнями объектов километрового размера в течение 1 млн. лет, что является вполне достаточным для ее сохранения. Подробному описанию физических свойств АСЗ посвящены также обзоры (Lupishko and Di Martino, 1998, Binzel et al., 2002, Lupishko et al., 2007).

Совместные поляриметрические наблюдения астероидов были начаты на Крымской астрофизической обсерватории АН СССР в 1983 г. и на обсерватории Санглок Института астрофизики в Душанбе в 1984 г. Одной из первых была программа поляриметрии СМЕУ-астероидов, предложенная И. Н. Бельской. СМЕУ-астероиды – это объекты С, М, Е-типов и неклассифицированные (unclassifiable) астероиды, которые не были однозначно классифицированы по типам из-за того, что их спектры в видимой области являются плоскими, без заметных полос поглощения, и подобными между собой. В то же время, они почти на порядок различаются по альбедо, к которому весьма чувствительна поляриметрия. Наблюдения были проведены в 1984 – 1987 г.г. на 1-м рефлекторе обсерватории Санглок вместе с сотрудниками Института астрофизики Н. Н. Киселевым и Г. П. Черновой. Использовался одноканальный фотоэлектрический поляриметр с быстрым (33 об/сек) вращением анализатора. В результате из 12-ти наблюденных СМЕУ-астероидов 9 были отнесены к М-типу, интерес к которому уже в то время был довольно высоким. Общее число М-асте-

роидов к 1987 году возросло, таким образом, до 24-х, что дало возможность более уверенно подтвердить их, в среднем, более быстрое осевое вращение по сравнению с С и S-типами (Бельская и др., 1987, 1991).

Изучение фазовых кривых поляризации астероидов главного пояса и сближающихся с Землей – одно из основных направлений нашей поляриметрии. Результаты проведенных наблюдений подтвердили, в частности, уникальные поляриметрические свойства одного из крупнейших астероидов 704 Интерамния – предельно малое на то время значение угла инверсии $15,7^\circ$ (Лупишко и др., 1994). Полученные впервые фазовые кривые поляризации АСЗ 1036 Ганимед, 1627 Ивар и 1685 Торо позволили оценить с хорошей точностью их альбедо, а также, что очень важно, и величину максимальной положительной поляризации $P_{\max} = 8,5 \div 10,5\%$ для астероидов S-типа (Киселев и др., 1990, 1994).

Астероиды, сближающиеся с Землей, предоставляют возможность наблюдать объекты в очень широком диапазоне фазовых углов и, в этом смысле, «помогают» нам изучать тела главного пояса, для которых большие фазовые углы при наземных наблюдениях не доступны. В декабре 2001 г. астероид группы Атона (т.е. потенциально опасный с точки зрения возможного столкновения с Землей) 33342 (1998 WT24) прошел от Земли на расстоянии 0,0125 а.е. и был доступен для наблюдений в северном полушарии на небольших телескопах. Одновременные фотометрические и поляриметрические наблюдения были проведены на трех обсерваториях (70-см рефлектор НИИ астрономии, 1,25 м – КрАО и 2.0 м – обсерватории Терскол на северном Кавказе) в течение 9 ночей, в диапазоне фазовых углов $\alpha = 12 \div 83^\circ$. Полученные фазовые кривые блеска и поляризации позволили уверенно классифицировать астероид как высокоальбедный объект E-типа и определить его основные характеристики (период вращения, вытянутость формы, альбедо $p_v = 0,43$, размеры 420×330 м). Вместе с имевшимися данными поляриметрии E-астероидов главного пояса 44 Низа и 64 Ангелина удалось получить полную фазовую кривую поляризации астероидов E-типа в полосе V. Эта кривая показала неожиданно малое значение максимальной положительной поляризации $P_{\max} = 1,68\%$ (против 8,5% для S-астероида 1685 Торо и 25-30 % для пылевых комет). Максимум оказался на фазовом угле $\alpha = 72^\circ$ (Kiselev et al., 2002), что тоже необычно. В работе принимали участие сотрудники НИИ астрономии Киселев Н. Н., Величко Ф. П., Лупишко Д. Ф., ГАО НАНУ – Розенбуш В. К., КрАО – Шаховской Н. М., Ефимов Ю. С. и Румянцев В. В., Института астрономии им. М. Планка (Катленбург-Линдау, Германия) – К. Йокерс.

Как уже отмечалось, в 1983 г. началось наше сотрудничество с Крымской астрофизической обсерваторией в поляриметрии астероидов. Сотрудники этой обсерватории Шаховской Н. М. и Ефимов Ю. С. к этому времени внедрили в практику поляриметрических наблюдений 5-ти цветный UBVR-I-поляриметр системы Пиирола на 1.25 м рефлекторе АЗТ-11. От АО ХГУ, кроме Д. Ф. Лупишко и И. Н. Бельской, в программе принимал участие также аспирант С. В. Васильев. Нас интересовало изучение спектральной зависимости параметров поляризации астероидов, поскольку раньше такие исследования практически не проводились. Наблюдения были направлены, в основном, на измерение отрицательной поляризации $P_{\min}$ астероидов разных типов во всех 5-ти спектральных полосах. Общий результат этих исследований сводится к тому, что абсолютная величина отрицательной поляризации средне- и высокоальбедных астероидов S, M, V и E-типов возрастает с длиной волны подобно тому, как это имеет место для каменных метеоритов (обыкновенных и энстатитовых хондритов, ахондритов) и основных породообразующих силикатов. В то же время низкоальбедные астероиды, как и углистые хондриты, показывают обратную зависимость, т.е. уменьшение $|P_{\min}|$ с длиной волны. Таким образом, характер зависимости определяется типом астероида (т.е. веществом) и имеет качественное сходство с соответствующими метеоритными аналогами (Бельская и др., 1987, 1989, Лупишко, 1998а). Остановимся на некоторых частных результатах этой программы, которые представляют интерес в качестве новых поляриметрических эффектов у астероидов.

В декабре 1992 – январе 1993 г.г. в течение шести ночей были проведены UBVR-I-наблюдения довольно крупного ($D \sim 3$ км) астероида группы Аполлона 4179 Тютатис и получены фазовые зависимости поляризации в диапазоне фазовых углов $15,8 \div 51,4^\circ$ (Lupishko et al., 1995). Оказалось, что когда значения второго параметра Стокса $Q = P \cdot \cos 2\theta_r$ большие (три даты с $\alpha > 30^\circ$, $Q = 1 \div 4\%$), параметр U с точностью до ошибок измерений равен нулю. Однако вблизи точки инверсии, где Q по своему значению близок к нулю, третий параметр $U = P \cdot \sin 2\theta_r$, наоборот, становится значимым. Три разные даты

наблюдений с $\alpha = 15,8 \div 18,6^\circ$ показывают, что значение угла θ_r отличалось от 0 или 90° и равнялось примерно 45° . При этом эффект проявляется во всех фильтрах, значительно превышая ошибки определения этого угла. Все это свидетельствует об отклонении вектора поляризации от плоскостей, перпендикулярной или параллельной плоскости рассеяния, и может говорить о присутствии поляризации, не связанной с плоскостью рассеяния. Каких-либо других указаний на подобный эффект у безатмосферных космических тел в литературе не обнаружено. Мы воспользовались весьма благоприятной возможностью проверить этот эффект на другом приближающемся к Земле астероиде – 1620 Географ (тоже S-тип), который наблюдали в сентябре 1994 г. на том же телескопе и с тем же поляриметром, и также вблизи точки инверсии (Васильев и др., 1996). Однако заметного отклонения вектора поляризации от плоскости рассеяния, как это имело место у Тоутатиса, не обнаружено. Угол θ_r с точностью до погрешностей измерений принимал значения вблизи 0 или 90° . Это дает несколько больше оснований утверждать, что обнаруженный у Тоутатиса эффект реален. Одно из возможных объяснений – это очень сложная форма Тоутатиса, вплоть до двойственности, при которой, в частности, возможна взаимная подсветка компонент отраженным при больших углах и поэтому достаточно сильно поляризованным излучением.

Вариации степени отрицательной поляризации по диску Весты были измерены в США еще в 1970-х годах, а в 1986 г. в рамках программы «Веста-86», инициированной нашей РГ «Астероиды», были подтверждены Н. Н. Киселевым по наблюдениям на Советско-Боливийской обсерватории. Его одновременные измерения блеска и поляризации в полосе V, кроме того, показали четкую обратную корреляцию модуля степени отрицательной поляризации и блеска при вращении астероида вокруг своей оси. В 1990 г. на 1,25-м рефлекторе КрАО были проведены поляриметрические UBVRI наблюдения Весты в течение ее полного оборота вокруг оси (5,342 часа). В полосе V относительные вариации степени поляризации $\Delta P/P$ оказались равными 0,24 и максимальными, поскольку они были получены при экваториальном аспекте астероида. Хорошо видна обратная корреляция степени поляризации в полосе V с кривой блеска в этой же полосе. Поскольку кривая блеска Весты обусловлена не столько формой, сколько распределением альбедо по поверхности, то обратная корреляция модуля отрицательной поляризации и блеска Весты есть не что иное, как проявление эффекта Умова. Таким образом, на примере Весты видно, что эффект Умова справедлив и для отрицательной поляризации. На рис. 2.2.8 представлен совершенно новый результат (не только для Весты, но для астероидов вообще) – это вариации позиционного угла плоскости поляризации θ с вращением астероида вокруг своей оси. Вариации угла θ оказались максимальными в полосе U ($\Delta\theta=8^\circ$) и минимальными в полосе I ($\Delta\theta=2,5^\circ$). Характер изменения вариаций по спектру, а также с фазой вращения, свидетельствует в пользу их реальности (цикличность диаграммы параметров Стокса Q и U Весты (Лупишко и др., 1999) подтверждает это). Повторные наблюдения Весты в 1996 г., тоже при экваториальном аспекте, однако, только в полосах UBV и только на протяжении 0,6 периода оборота астероида, подтвердили наличие вариаций с вращением позиционного угла θ и дали даже несколько большую их амплитуду. Кроме того, в оба противостояния имеют место систематические отклонения плоскости поляризации от плоскости рассеяния в среднем на два градуса. Наблюдаемое поведение угла θ объяснено существованием на поверхности Весты линейных, упорядоченно ориентированных структур типа «grooves» (борозды, трещины) и/или склонов, образовавшихся вместе с гигантским кратером ($D=460$ км), обнаруженным на Весте с помощью космического телескопа Хаббла. Сопоставление вариаций угла θ по фазе вращения с топографией Весты, т.е., положением кратера на диске, хорошо согласуется с предложенной гипотезой (Лупишко и др., 1999).

У большинства безатмосферных космических тел, как известно, наблюдается нелинейное возрастание блеска вблизи оппозиции (см. выше) – так называемый фотометрический оппозиционный эффект (ФОЭ). Для некоторых высокоальбедных спутников Юпитера (галилеевых) и Сатурна был найден также поляриметрический оппозиционный эффект (ПОЭ) как вторичный минимум глубиной $\sim 0,3\%$ на отрицательной ветви фазовой кривой при $\alpha < 2^\circ$ (Rosenbush et al., 2002). В связи с этим, Киселев Н. Н. совместно с Розенбуш В. К. (ГАО НАНУ) предприняли поиски ПОЭ у высокоальбедных астероидов E-типа главного пояса 44 Низа и 64 Ангелина. Наблюдения Ангелины проводились на 1,25 м рефлекторе АЗТ-11 КрАО в течение трех оппозиций с 1995 по 2001 г.г., а Низы – на телескопах 2,6 м ЗТШ (КрАО) и 0,7 м АЗТ-8 нашего института в августе 2005 г. В результате нескольких попыток искомый

эффект впервые для астероидов был сначала выявлен у 64 Ангелины как вторичный минимум на отрицательной ветви фазовой кривой поляризации глубиной около 0,4%, центрированный на $\alpha=1,8^\circ$ (Rosenbush et al., 2005), а затем и у 44 Низы. Обнаружение ПОЕ у высокоальбедных спутников и астероидов подтверждает теоретические представления о том, что основным механизмом возникновения оппозиционных эффектов блеска и поляризации у таких тел есть механизм когерентного усиления обратного рассеяния.

Исследованию корреляции фотометрических и поляриметрических характеристик оппозиционных эффектов посвящены работы Бельской и др. (Belskaya et al., 2003b, 2005). Показано, что у некоторых низкоальбедных астероидов нелинейное возрастание блеска вблизи оппозиции практически отсутствует, и это сопровождается аномально неглубокой ветвью отрицательной поляризации с малым углом инверсии. Возможность существования такого эффекта также предсказывалась в рамках механизма обратного когерентного рассеяния света.

В последние годы поляриметрические наблюдения астероидов активно проводятся с использованием крупных телескопов в рамках кооперативных программ с учеными Италии, Франции и Аргентины. Это позволило значительно увеличить количество астероидов, для которых имеются измерения степени линейной поляризации света, и существенно расширить данные о поляриметрических свойствах поверхностей астероидов редких композиционных типов. В частности, обнаружены астероиды с экстремальными поляриметрическими свойствами поверхности. Так, у астероида F-типа 419 Аурелия с альбедо поверхности 0,05 ветвь отрицательной поляризации оказалась нехарактерной для низкоальбедных поверхностей с $P_{\min} \sim 1\%$ и рекордно малым углом инверсии $\alpha_{\text{inv}} \sim 14^\circ$ (Belskaya et al., 2005). В то же время у астероида S-типа 234 Барбара с альбедо поверхности 0,23 обнаружена глубокая ветвь поляризации с $P_{\min} \geq 1,3\%$ и рекордно большим углом инверсии $\alpha_{\text{inv}} > 26^\circ$ (Cellino et al., 2006). Интерпретация таких свойств в настоящее время затруднительна, но в любом случае, вызвано ли такое поведение поляризации особым составом и/или структурой поверхности, оно является нетипичным для астероидов, так как только один из всех наблюдавшихся астероидов имеет столь большой угол инверсии.

В связи с накоплением большого числа данных поляриметрических наблюдений астероидов и продолжающимся их пополнением, а также в связи с тем, что форма представления этих данных у каждого автора своя, совместное использование их оказалось весьма трудным. В то же время суммарный объем данных наблюдений (свыше 100 астероидов) был достаточным для проведения различного рода статистических анализов, особенно с использованием данных других методов исследований. Для этого необходимо было унифицировать форму представления результатов наблюдений и иметь все данные (в том числе и новые) в едином формате. Именно с этой целью и создан Поляриметрический банк астероидных данных (ПБАД) (Васильев, 1996, Лупишко и Васильев, 1997). Последняя версия ПБАД содержит в едином формате опубликованные и неопубликованные результаты поляриметрических наблюдений свыше 130 астероидов. ПБАД снабжен сервисными программами и включает в себя также файл литературных источников по поляриметрии астероидов (свыше 200 ссылок). Он вошел составной частью в Международную базу данных НАСА («Planetary Data System»), является доступным через сеть Internet (<http://PDS.jpl.nasa.gov/>) и ежегодно пополняется новыми наблюдательными данными.

Исследования астероидов, безусловно, не ограничивались только проведением наблюдений, обработкой и интерпретацией полученных данных о конкретных астероидах. Много внимания уделялось также постановке новых наблюдательных программ, а также анализу и интерпретации всех имеющихся данных по тем или иным проблемам физики астероидов. Одно из таких исследований было посвящено составу вещества астероидов M-типа («металлических»). Дело в том, что до конца 1970-х годов детальных исследований астероидов этого типа не проводилось. Наиболее серьезной попыткой интерпретации имеющихся малочисленных поляриметрических наблюдений M-астероидов были лабораторные поляриметрические измерения металлических порошков, проведенные Дольфюсом и др. во Франции [4]. На основе этих измерений был сделан вывод о том, что поверхности M-астероидов не могут быть силикатными, а представляют собой слой металлических фрагментов размерами 20–50 мкм. Этот вывод нам показался слишком смелым и, возможно, недостаточно обоснованным. Поскольку природа M-астероидов представляет значительный научный и прикладной интерес (возможные ядра дифференцированных

космических тел, позволяющие изучать их недра, источники металлов и т.п.), была предпринята широкая программа фотометрических и поляриметрических наблюдений крупнейших астероидов М-типа и соответствующих лабораторных фотометрических и поляриметрических измерений ряда метеоритных и земных образцов различного состава, но примерно одинаковой структуры (22 образца, представляющих основные типы метеоритов, земные пороодообразующие силикаты и техногенные металлы Fe, Ni, Al, Pb). Анализировались полученные данные по фазовым зависимостям блеска и поляризации астероидов и образцов, причем основная идея состояла в том, что сравнивались данные по астероидам (М и S-типов) между собой и по образцам (металлическим и силикатным) между собой. В результате проведенного исследования с использованием имеющихся спектральных данных было показано, что поверхности крупнейших М-астероидов не являются чисто металлическими (как утверждали Дольфус и др. [4]), а содержат значительную силикатную компоненту (Lupishko and Belskaya, 1989). Этот вывод подтверждается данными о средних скоростях вращения астероидов основных типов в рамках теории Харриса [5] и более поздними спектральными данными американских и российских коллег, нашедших в спектрах М-астероидов интенсивные полосы поглощения силикатов [6-8]. Наиболее подходящими метеоритными аналогами вещества М-астероидов, как было показано, могут быть железо-каменные метеориты – мезосидериты и энстатитовые хондриты типа E4. Эти исследования легли в основу кандидатской диссертации И. Н. Бельской (1987).

Еще одна работа, связанная с минералогией астероидов, была выполнена Ф. П. Величко вместе с коллегами из Астрофизического института АН Казахской ССР (Алма-Ата). В 1986 и 1988 г.г. на 70-см рефлекторе АЗТ-8 этого института, оснащенном двухканальным спектрометром, были проведены спектрофотометрические наблюдения астероида 4 Веста в полосе поглощения пироксена λ 920 нм. Анализ результатов измерений выявил вариации интенсивности поглощения в этой полосе с вращением астероида вокруг своей оси амплитудой 6-8%, что, по мнению авторов этой работы (Вдовиченко и др., 1990), связано главным образом с изменениями глубины исследуемой полосы. Это указывает на значительную неравномерность в распределении пироксена по поверхности Весты либо степени зрелости (возраста) или же раздробленности пироксеносодержащего вещества некоторой области на астероиде, подверженной ударному воздействию. Анализ индивидуальных спектров, полученных при разных фазах вращения Весты, выявил тенденцию к смещению центра полосы в длинноволновую область спектра при возрастании ее глубины. На этом основании авторы сделали вывод о том, что предполагаемое «пироксеновое пятно» может иметь более высокое содержание кальция. Оценка его положения на поверхности астероида показывает, что оно расположено в южной полусфере не ближе, чем в 30° от экватора, и имеет диаметр $20 - 40^\circ$ в планетографической системе координат. Не без оснований авторы этого исследования отмечают, кроме того, что «образование крупного кратера на Весте могло оказаться причиной более быстрого (по сравнению с другими астероидами сопоставимого размера) ее вращения». С удовольствием заметим, что 6 лет спустя после опубликования этих результатов, с помощью космического телескопа Хаббла на Весте обнаружен гигантский кратер размером 460 км (при диаметре астероида 525 км), который вместе с валом занимает большую часть южного полушария [9]. В этой статье, в частности, отмечается, что глубина и ширина полосы поглощения вблизи 1 мкм возрастают с глубиной рельефа в области кратера, что соответствует более высокому содержанию кальция в открывшихся нижележащих слоях. Таким образом, выводы о причинах вариаций полосы λ 920 нм и более высокое содержание кальция в «пироксеновом пятне» (Вдовиченко и др., 1990) подтверждены данными телескопа Хаббла.

Закон рассеяния света (ЗРС) поверхностью астероида является ее важнейшей оптической характеристикой, знание которой необходимо для самых различных целей. Однако, в отличие от Луны и больших планет, изучение ЗРС поверхностями астероидов является задачей довольно сложной, поскольку мы измеряем лишь интегральный блеск объекта и, как правило, в малом диапазоне фазовых углов. Наша идея состояла в том, чтобы для оценки вида функции распределения яркости по диску астероида использовать интегральную характеристику блеска, а именно: зависимость амплитуды кривой блеска от фазового угла $A(\alpha)$, поскольку амплитуда кривой блеска содержит в себе информацию не только о форме, альбедной неоднородности, геометрии наблюдения астероида, но и о

законе рассеяния света его поверхностью. В наблюдаемом с Земли диапазоне фазовых углов амплитуды кривых блеска астероидов возрастают линейно с углом фазы, при этом наклон зависимости прямо пропорционален величине амплитуды при нулевом фазовом угле $A(0^\circ)$. Задача, таким образом, сводится к численному моделированию зависимости $A(\alpha)$ для всех известных ЗРС, сравнению с результатами наблюдений и определению наиболее пригодного закона для описания распределения яркости по диску астероида. В результате проведенного исследования (Акимов и др., 1992) авторами впервые было показано, что из всех используемых в физике планет законов рассеяния света только законы Хапке и Акимова достаточно хорошо воспроизводят наблюдаемую для астероидов зависимость $A(\alpha)$, то есть адекватно описывают распределение яркости по диску. Для практических целей рекомендовано использовать законы Акимова (Акимов, 1988), и в первую очередь теоретический, который намного проще и удобнее, чем улучшенный закон Хапке. Последний, в силу большого числа свободных параметров, приводит к неоднозначному решению.

Вопрос о том, насколько поверхности астероидов фотометрически неоднородны, является весьма важным для понимания процессов их формирования и переработки. Ранее, на основании измерения вариаций цвета и поляризации с вращением астероида вокруг своей оси был сделан вывод, что поверхности большинства астероидов являются в значительной степени фотометрически однородными, следовательно, кривые блеска обусловлены формой астероидов, а вклад вариаций альбедо незначителен [10]. Однако отождествление ЗРС, наиболее адекватно описывающего рассеивающие свойства астероидных поверхностей, позволило нам найти новый подход к решению этого вопроса (Акимов и др., 1983). Было показано, что наиболее чувствительной величиной для обнаружения фотометрических неоднородностей астероидных поверхностей является их отражательная способность, если мы можем учесть (исключить) влияние формы астероида на его кривую блеска. Если поверхность фотометрически однородна и отражает по закону Акимова (то есть имеет распределение яркости по диску астероида такое же, как у лунного реголита), то в противостояние ($\alpha = 0^\circ$) при любой форме астероида разность блеска его противоположных сторон должна быть равна нулю, поскольку в этом случае количество отраженного света равно произведению площади видимого поперечного сечения фигуры на среднее альбедо видимой поверхности. Отклонение от этой закономерности можно рассматривать как признак фотометрической неоднородности. На основе этой идеи предложен метод оценки величины фотометрической неоднородности поверхностей астероидов и разграничения вклада альбедных вариаций и формы астероида в кривую блеска. Было показано, в частности (Акимов и др., 1983), что вариации отражательной способности, усредненные по видимой стороне (полусфере) некоторых астероидов, достигают значений 0,20 зв. вел., то есть больше, чем для поверхностей Марса и галилеевых спутников Юпитера. Таким образом, поверхности астероидов оказались фотометрически значительно более неоднородными, чем считалось ранее.

Небольшой цикл работ, выполненных в нашей группе, посвящен определениям альбедо астероидов (Lupishko and Mohamed, 1996, Лупишко, 1998б, Лупишко, 1998в, Shevchenko and Tedesco, 2006). Дело в том, что с опубликованием второй версии IRAS-альбедо и диаметров астероидов [11] фактически была предложена новая шкала геометрических альбедо астероидов. Эта шкала в качестве абсолютной звездной величины использовала не $V(1,0)$, то есть экстраполяцию линейной части фазовой кривой блеска на $\alpha=0^\circ$, а параметр H , который отличается от $V(1,0)$ на величину опозиционного эффекта астероида в точке $\alpha=0^\circ$. При этом бралась средняя величина опозиционного эффекта, а она, как мы теперь знаем (Belskaya and Shevchenko, 2000), зависит от альбедо астероида. В результате, новые IRAS-альбедо стали «конфликтовать» с поляриметрическими, радиометрическими и др. Это как раз и стимулировало проведение исследований, касающихся альбедо астероидов.

Поляриметрический метод определения альбедо астероида основан, как известно, на использовании эмпирических зависимостей «наклон h – альбедо» и « $P_{\min}$ – альбедо», константы которых были получены более 30 лет назад по лабораторным измерениям метеоритных образцов. С тех пор получены другие ряды определений альбедо астероидов, в частности, а) наземные радиометрические альбедо; б) радиометрические IRAS-альбедо; в) альбедо из наблюдений покрытий звезд астероидами. Кроме того, начиная с 1984 г. нами

были проведены новые поляриметрические наблюдения и определены параметры поляризационных фазовых кривых $P_{\min}$ и h еще для 34 астероидов. Используя все эти данные, Лупишко Д. Ф. и его аспирант из Ливии Рафа Мохамед предложили новую калибровку шкалы поляриметрических альбедо, то есть новое определение констант отмеченных выше зависимостей (Mohamed, 1995, Lupishko and Mohamed, 1996). Сравнение новых поляриметрических альбедо астероидов со старыми показало, что они, в принципе, различаются не сильно. Это означает, что эмпирические соотношения «наклон h – альбедо» и « $P_{\min}$ – альбедо» оказались достаточно универсальными, одинаково хорошо удовлетворяющими как лабораторным образцам, так и поверхностям реальных астероидов. Однако новые константы этих соотношений заметно улучшили внутреннюю сходимость определения альбедо независимо по двум параметрам $P_{\min}$ и h (Лупишко, 1998а).

IRAS-альбедо и диаметры астероидов [11], как известно, определены для более чем 2000 астероидов и поэтому представляют самый большой массив относительно однородных данных, по численности превышающий остальные ряды определений этих параметров на 1-2 порядка. Как самые многочисленные, IRAS-данные используются для решения задач классификации астероидов, выделения и изучения физических семейств астероидов, интерпретации радарных наблюдений, оценки плотностей и пористости астероидов и др. Однако, наряду с этим, IRAS-альбедо (и, соответственно, IRAS-диаметры), как оказалось, отягощены значительными случайными и систематическими ошибками.

В результате сравнения IRAS-альбедо с остальными рядами определений геометрического альбедо астероидов (наземными радиометрическими, поляриметрическими и альбедо, полученными из покрытий звезд астероидами) было показано (Лупишко, 1998б), что: а) систематические погрешности IRAS-альбедо возрастают прямо пропорционально величине самого альбедо и б) поляриметрические альбедо являются промежуточными между IRAS и наземными радиометрическими альбедо и ближе всего соответствуют наиболее точным значениям альбедо, полученным из покрытий. Именно по этой причине поляриметрические альбедо 127 астероидов, полученные по новой калибровке (Lupishko and Mohamed, 1996), были использованы для определения систематической ошибки IRAS-альбедо и ее исключения. Предложенная методика определения и учета систематической ошибки IRAS-альбедо (Лупишко, 1998б) позволяет получать более точные значения IRAS-альбедо и диаметров астероидов по сравнению с исходными каталожными данными.

Новый шаг в улучшении альбедо астероидов предпринял В. Г. Шевченко совместно с американским коллегой Э. Тедеско. Поскольку диаметры астероидов, определяемые из покрытий звезд астероидами, являются наиболее точными по сравнению с получаемыми другими наземными методами, то, используя абсолютную звездную величину, можно определить и их альбедо из покрытий, которые тоже должны быть наиболее точными. Из-за отсутствия определений абсолютных звездных величин астероидов для тех геометрических условий, при которых наблюдались покрытия, сложилась такая ситуация, что альбедо из покрытий определены на данный момент всего для примерно десяти астероидов, в то время как диаметры из покрытий имеются для более чем ста астероидов. Таким образом, основная задача состояла в том, чтобы максимально точно определить абсолютную звездную величину астероида H для того аспекта, при котором получен его диаметр из наблюдений покрытия. Для ряда астероидов она была определена по их фазовым зависимостям при тех же аспектах, что и наблюдения покрытий, а для остальных – бралась из Asteroid Photometric Catalogue [12] и редуцировалась на момент покрытия, с использованием фотометрической модели астероида, разработанной Шевченко (1997а). Модель учитывала изменение площади проекции астероида из-за изменения аспекта. В некоторых случаях величина H вычислялась по фазовой функции (Шевченко, 1997б); средние значения оппозиционного эффекта брались из работы (Belskaya and Shevchenko, 2000). В результате получено альбедо из покрытий 57 астероидов разных типов, для 18-ти из которых с ошибкой не более 5 %. Они могут быть использованы для калибровки шкалы альбедо астероидов, полученных другими методами.

Из-за ограниченности объема данного обзора в него не включены такие важные результаты, как оценка величины смещения фотоцентра астероида при астрометрических наблюдениях (Тунгалаг и др., 2000), обнаруженная бимодальность в распределении альбедо S-астероидов (Лупишко, 1998в), результаты UBVRI-поляриметрии астероидов 1

Церера (Лупишко, 1998а) и 16 Психея (Бельская и др., 1985); зависимость доли астероидов с обратным вращением от их диаметров (Тунгалаг и др., 2003), инверсия спектрального хода поляризации S-астероидов (Лупишко, 1998а) и многие другие, которые заинтересованный читатель сможет найти в соответствующих ссылках.

Кометы

С приходом в наш отдел в 1995 г. Н. Н. Киселева тематика отдела была дополнена поляриметрическими и фотометрическими исследованиями комет, причем акцент был сделан на сравнительном изучении характеристик астероидов и комет. Несмотря на различие физических свойств, наблюдаемые характеристики рассеянного излучения астероидов и комет похожи. Например, фазовые зависимости их поляризации (ФЗП) показывают отрицательную ветвь с близкими параметрами $P_{\min} \approx -1,5\%$, $\alpha_{\min} \approx 10^\circ$, $\alpha_{\text{inv}} \approx 22^\circ$, поляриметрический наклон $h \approx 0,3\%$ на градус и положение максимума поляризации $\alpha_{\max} \approx 100^\circ$. Близость параметров ФЗП комет и низкоальбедных астероидов С, Р и D-типов отмечалась в ряде исследований. Для астероидов и комет наблюдаются похожие фотометрические оппозиционные эффекты. Удивительное подобие оппозиционных эффектов указывает на то, что существует единый физический механизм рассеяния света, отвечающий за эти эффекты (Шкуратов, 1997), и он носит, по-видимому, фундаментальный характер. Вместе с тем, для астероидов и комет наблюдаются явные различия в спектральных зависимостях поляризации. Поэтому выявление сходства и различия рассеивающих свойств пылевых частиц комет и реголита астероидов может стимулировать развитие теоретических механизмов рассеяния света и разработку моделей рассеяния света пылевыми частицами безатмосферных космических тел и полидисперсных сред, таких как кометные атмосферы, кольца планет и межпланетное пылевое облако. Кроме отмеченных выше причин, необходимость сравнительного исследования астероидов и комет определяется их генетической и эволюционной связью и той ролью, которую оба класса малых тел могут сыграть в проблеме астероидно-кометной опасности.

Фотометрические и поляриметрические наблюдения комет в нашем отделе были начаты в 1996 г. Н. Н. Киселевым и Ф. П. Величко. В 2000 г. к ним присоединился сын последнего, Сергей Величко, – студент астрономического отделения физического факультета нашего университета с 2001 г. и аспирант НИИ астрономии – с 2006 г. В период 1996–2006 г.г. были проведены поляриметрические и фотометрические наблюдения комет C/1995 O1(Хейла-Боппа), C/1996 B2(Хиакутаке), 21P/Джакобини-Циннера, D/1999 S4 (LINEAR), C/2001 A2 (LINEAR), 153P/Икея-Жанг, C/2003 K4 (LINEAR) и C/2004 Q2 (Мачхольца). Все наблюдения выполнены с одноканальным фотометром-поляриметром на 0,7-м телескопе АЗТ-8 Чугуевской наблюдательной станции. В большинстве случаев наблюдения проводились с использованием специальных узкополосных кометных фильтров, выделяющих области кометного континуума и молекулярных эмиссий. Для вычисления производительности молекулярных эмиссий и пыли использовалась модель Хазера и методика, рекомендованная М. А'Херном в рамках проведения Международной службы кометы Галлея (IHW) (см., например, Kiselev and Velichko, 1997, 1998). Ряд поляриметрических исследований комет был проведен по кооперативным программам с ГАО НАН Украины (В. Розенбуш), Институтом исследования тел Солнечной системы в Катленбург-Линдау, ФРГ (К. Йокерс) и Крымской астрофизической обсерваторией (Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов). Использовались 2-м телескоп обсерватории Пик Терскол, 1,25-м и 2,6-м телескопы КрАО. Перечень исследованных комет приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сводка поляриметрических и фотометрических наблюдений комет

Исследование каждой кометы является существенным дополнением наших знаний как об индивидуальных свойствах, так и об общих закономерностях поляризованного излучения комет. С этих позиций мы проводили наблюдения каждой доступной для нашего телескопа кометы. Однако основное направление исследований заключалось в решении проблемы классификации комет, основанной на поляриметрических и фотометрических свойствах их рассеянного излучения, и выявлении связи физических характеристик комет с их местами происхождения. Наблюдаемое различие в максимальной степени поляризации двух групп комет было отмечено еще в кандидатской диссертации Н. Н. Киселева в 1982 г. Однако интерпретировалось это различие по-разному. В работах [13,14] деление комет на два или даже три класса на основе различий поляризации их излучения на больших фазовых углах объяснялось разными физическими свойствами пыли, в частности, размерами пылевых частиц. Систематическое исследование в этом направлении было проведено в докторской диссертации Киселева (2003), в которой реальность таксономии комет на поляриметрические классы была поставлена под сомнение. Исследование газовых комет D/1996 Q1 (Табура) (Киселев и др., 2001b) и C/2001 A2 (LINEAR) (Rosenbush et al., 2002) выявило значительную зависимость степени поляризации комет от размера измеряемой области комы. Для решения этой проблемы в ноябре 2003 г. была проведена кооперативная программа поляриметрических наблюдений газовой кометы 2P/Энке (Jockers et al., 2005). Было показано, что пыль в газовых кометах сосредоточена в небольшой, размером ≤ 600 км, околоядерной области, и что степень поляризации в этой области такая же высокая, как и у пылевых комет. Тем самым впервые убедительно было доказано, что деление комет на две группы: пылевые, с высокой степенью поляризации, и газовые, с низкой степенью поляризации на больших фазовых углах, является артефактом, вызванным низким пространственным и спектральным разрешением аппаратуры, используемой для поляриметрических наблюдений.

В работах (Киселев, 2003, Kiselev et al., 2005) обобщены исследования многих комет и получены их составные фазовые зависимости линейной поляризации, см. рис. 2.2.9. Было показано, что для пылевых комет имеется хорошее согласие между данными, полученными для узкополосных и широкополосных фильтров (рис. 2.2.9, слева). Это очевидно, так как при высоком уровне непрерывного спектра вклад эмиссий в континуумные фильтры будет незначительным. Противоположная картина наблюдается для газовых комет, поляризация

которых сильно зависит от измеряемой области комы и полосы пропускания используемого фильтра, что приводит к значительному разбросу данных на составной фазовой зависимости поляризации комет, как показано на рис. 2.2.9, справа. Результаты наших поляриметрических исследований газовых и пылевых комет и их сопоставление с опубликованными данными по тепловым свойствам пылинок, полученным на основе ИК-наблюдений, позволяют заключить, что не только размер пылинок, но и их пористость определяют основные наблюдаемые свойства.

Одной из трудностей поляриметрических исследований комет было отсутствие полных фазовых зависимостей поляризации, которые включали бы в себя максимальную степень поляризации. Предполагалось, что максимум степени поляризации комет лежит на 90° , что соответствует рассеянию света на релеевских частицах. Мы провели наблюдения комет C/1995 B2 (Хиакутаке) (Kiselev and Velichko, 1998), D/1999 S4 (ЛИНЕАР) (Киселев и др., 2001a) и 153P/Икея-Жанг (Velichko and Velichko, 2002), предоставлявших возможность наблюдений на больших фазовых углах, и впервые нашли, что среднее значение максимальной степени поляризации комет лежит на фазовом угле $95 \pm 1^\circ$ и слабо зависит от длины волны.

Спектральная зависимость поляризации континуума комет является одной из важнейших характеристик, необходимых для определения физических свойств пыли. До исследования кометы Галлея в литературе обсуждались две возможности: степень поляризации возрастает с увеличением длины волны или поляризация не зависит от длины волны. Анализ наблюдений ряда комет (Kiselev et al., 2005) в широком спектральном диапазоне свидетельствует о том, что степень поляризации большинства комет немонотонно растет с увеличением длины волны в области 0,36–2,2 мкм. Кроме того, спектральный ход поляризации зависит от фазового угла, становясь почти плоским на фазовых углах менее 30° . Однако наше исследование кометы 21P/ Джакобини-Циннера (Kiselev et al., 2000a, Kiselev et al., 2000b), проведенное по кооперативной программе, впервые выявило аномальную зависимость степени поляризации от длины волны, а именно, поляризация уменьшается с λ . Вследствие этой особенности фазовая зависимость поляризации кометы Джакобини-Циннера систематически на $\sim 2\%$ ниже (рис. 2.2.9), по сравнению с зависимостью для других пылевых комет.

Причиной необычного спектрального тренда поляризации кометы может быть большое содержание органического вещества в комете (Kiselev et al., 2000a, Kiselev et al., 2000b). Косвенно о необычных свойствах пыли в комете Джакобини-Циннера свидетельствуют ее аномальный химический состав и исследования метеорного потока Драконид, прародительницей которого она является. Согласно работе [15], в метеороидах потока Драконид доля органического вещества составляет около 90%. Подобный ход спектральной зависимости поляризации большую часть времени наблюдался и у кометы D/1999 S4 (LINEAR) (Velichko, 2002, Киселев, 2003). Интересно отметить, что обе кометы принадлежат к группе комет с дефицитом углеродосодержащих молекул.

Кометы – нестационарные и быстро эволюционирующие при сближении с Солнцем малые тела. Развитие газопылевых атмосфер и хвостов комет и вызывающие их физические процессы для каждой кометы уникальны, а для большинства долгопериодических комет неповторимы. Таким уникальным объектом была комета C/1995 O1 (Хейла-Боппа). Наши фотометрические исследования (Kiselev and Velichko, 1997) показали, что производительность молекул газа была на порядок, а производительность пыли на два порядка больше, чем соответствующие величины у кометы Галлея. Комета Хейла-Боппа была самой запыленной из всех известных комет. Мы обнаружили также, что степень ее поляризации на сопоставимых фазовых углах была на $\approx 4\%$ выше любой другой кометы. Это хорошо видно на рис. 2.2.9. Высокая степень поляризации излучения кометы Хейла-Боппа вызвана особыми оптическими свойствами ее пылевых частиц. Рассеяние света на мелких и/или темных пылевых частицах может приводить к высокой степени поляризации [16]. В соответствии с этим можно заключить, что атмосфера кометы Хейла-Боппа имела необычно высокое содержание мелких поглощающих пылинок по сравнению с другими кометами. Этот вывод подтвержден количественными оценками, сделанными на основе результатов ИК-наблюдений, согласно которым в атмосфере кометы преобладали пылевые частицы с радиусом $< 0,4$ мкм [17].

Другим уникальным объектом была комета D/1999 S4 (LINEAR). Возможность

наблюдений достаточно яркой кометы на большом диапазоне фазовых углов $55 - 121^\circ$ определила первоначальную задачу наблюдений – нахождение максимума поляризации излучения кометного континуума. Однако во время наблюдений 28 и 29 июля 2000 г. было обнаружено разительное изменение вида кометы. Кома практически полностью исчезла, и у кометы был виден только один хвост с равномерной и низкой поверхностной яркостью. Измерения дали резкое увеличение степени поляризации кометы (почти на 4%), согласующееся с изменением вида кометы (Киселев и др., 2001а). Причина значительного увеличения степени поляризации кометы связана с тем, что дезинтеграция ядра кометы привела к увеличению числа мелких пылевых частиц в ее атмосфере.

Исследование внутренней структуры и свойств кометных ядер (в том числе и пылевой составляющей) возможны в редких случаях наблюдений комет в процессе их частичной фрагментации или полной дезинтеграции. Вызвать искусственный выброс внутренней материи ядра комет был призван эксперимент «DEEP IMPACT». При сближении 4 июля 2005 г. КА с кометой 9P/Темпель 1 проведено столкновение специального устройства (импактора) с ядром кометы, в результате чего произошел выброс «свежей» материи из ядра кометы. Важная роль в осуществлении этого эксперимента отводилась наземным наблюдениям. К сожалению, нам удалось провести наблюдения кометы только до столкновения. Однако результаты наших наблюдений дополняют сведения о комете и могут быть сопоставлены с результатами других авторов, полученных как до, так и после столкновения импактора с ядром кометы. Результаты показывают, что степень поляризации излучения кометы Темпель 1 в фильтре R была на $\approx 1,8\%$ ниже типичной степени поляризации других пылевых комет на сопоставимых фазовых углах.

Построение реалистичной модели рассеяния света на пылевых частицах невозможно без учета формы пылинок. Информацию о форме пылинок, механизмах ориентации несферических частиц и о составе можно получить, исследуя круговую поляризацию. С этой целью в отделе был создан фотометр-поляриметр «STOKES-4», с помощью которого можно проводить одновременные измерения круговой и линейной степени поляризации небесных тел. С помощью этого прибора проведены пробные наблюдения круговой поляризации нескольких астероидов и комет. Для кометы C/2003 K4 (LINEAR) 15 – 16 августа 2004 была обнаружена интегральная круговая поляризация на уровне $\approx 0,5\%$.

Для анализа свойств поляризованного излучения комет, теоретического моделирования фазовых и спектральных зависимостей поляризации, классификации комет на основе данных поляриметрии, фотометрии, спектроскопии и динамических характеристик комет, а также и для других целей удобно иметь все результаты поляриметрии комет в одном файле-каталоге. Собранные и упорядоченные данные могут служить экспериментальной основой для многих целей, в частности, при планировании космических миссий к кометам. В связи с этим была выполнена работа по составлению электронной базы данных поляриметрии комет. База данных содержит сведения о линейной и круговой поляризации излучения 64 комет – всего 2653 наблюдений, проведенных в период с 1940 по 2005 г.г. Представленные данные охватывают спектральный диапазон $0,3 - 2,2$ мкм, диапазон фазовых углов $0,4 - 122^\circ$, гелиоцентрических и геоцентрических расстояний комет $0,6 - 4,8$ а.е. и $0,03 - 4,9$ а.е., соответственно. Часть данных из этой базы была использована для анализа поляриметрических свойств комет (Kiselev et al., 2005). Созданная база данных по поляриметрии комет с 2006 г. является составной частью международной базы данных (EAR-C-COMPIL-5-DB-COMET-POLARIMETRYV1.0, NASA Planetary Data System) и доступна для пользователей.

Объекты пояса Койпера

Обнаружение внешнего пояса малых тел, находящегося за орбитой Нептуна, существенно изменило представление о Солнечной системе. Главный пояс астероидов, расположенный между орбитами Марса и Юпитера, перестал быть «уникальным» образованием, а планета Плутон оказалась одним из объектов Койперовского пояса. За 15 лет, прошедших с обнаружения первого транснептуного объекта в 1992 г., открыто более 1100 таких тел, распределение орбит которых показало сложную динамическую структуру внешнего пояса. Принято выделять три класса транснептуновых объектов (ТНО): классические, имеющие близкие к круговым орбиты с большими полуосями $42 - 48$ а.е.; резонансные, находящиеся в резонансах с орбитальным движением Нептуна, и объекты рассеянного диска,

отличающиеся вытянутыми орбитами с высокими наклонениями, простирающимися на много далее 50 а.е. Считается, что популяция Кентавров, к которой относят тела, имеющие перигелий и большую полуось между орбитами Юпитера и Нептуна, также динамически связана с ТНО и представляет собой переходную популяцию от объектов рассеянного диска к кометам семейства Юпитера. Понимание процессов происхождения и эволюции внешнего пояса малых тел, их взаимосвязей с кометами и астероидами внутреннего пояса – один из ключевых космогонических вопросов.

Сразу же после открытия первых тел за орбитой Нептуна, началось интенсивное изучение их физических свойств всеми доступными методами как с помощью наземных, так и космических телескопов. Основная сложность наблюдений связана со слабым видимым блеском большинства этих объектов. Для их наблюдений необходимы очень крупные телескопы с диаметром зеркала 8 – 10 м. По инициативе группы европейских астрономов, под руководством Г. Бонарта (Германия) и А. Баруччи (Франция), в 2001 г. была начата кооперативная программа спектрофотометрических и поляриметрических наблюдений ТНО на 8-м телескопах Южной Европейской обсерватории (Чили). И. Н. Бельская вошла в состав участников этого масштабного проекта.

Одним из важных результатов проведенных наблюдений стали измерения широкополосных показателей цвета поверхностей более 70 транснептуновых объектов в видимой и ближней ИК областях спектра. Цвет поверхности дает первое представление о ее возможном составе, а знание показателей цвета большого числа объектов позволяет ответить на вопрос, существуют ли среди ТНО группы объектов с подобными свойствами. Именно измерения показателей цвета легли в основу классификации астероидов главного пояса по типам поверхности, ставшей эффективным инструментом в изучении их физических свойств. А. Баруччи и И. Н. Бельская предложили первую таксономию тел Койперовского пояса и Кентавров, основанную на данных измерений показателей цвета B-V, V-R, V-I, V-J для 51 объекта (Barucci et al., 2005). Были выделены четыре однородные группы тел, для обозначения которых в отличие от таксономии астероидов предложены двухбуквенные названия BB, BR, IR, RR. Тела с нейтральными цветами по отношению к Солнцу отнесены к BB-типу, а с очень красными цветами – к RR-типу, BR тип включает объекты с промежуточными цветами, а IR-тип – умеренно красные тела (рис. 2.2.10). BB и BR типы имеют спектры, подобные астероидам C и D-типов, тогда как для остальных типов аналогов среди астероидов главного пояса не найдено. Интересно отметить, что среди Кентавров выделяются только два класса объектов, что подтверждает вывод Peirinho et al. (2003) о бимодальности их распределения по цветам, и, возможно, свидетельствует о двух различных источниках их происхождения. Найдены и другие корреляции между типами поверхности и орбитальными параметрами. В частности, большая часть классических тел принадлежит к RR-типу, а тела с высокими наклонениями орбит – к BB-типу. Один из важных вопросов, на который еще предстоит получить ответ, – является ли разнообразие цветов поверхностей ТНО результатом различий в их составе или связано с различной степенью переработки поверхностей в процессе эволюции.

Наземные наблюдения объектов Койперовского пояса могут быть проведены только на малых фазовых углах, так как для тех расстояний от Солнца, где они находятся (~40 а.е.), фазовый угол не превышает 2°. На столь малых фазовых углах существенную роль должен играть оппозиционный эффект. Опыт исследования оппозиционного эффекта астероидов, накопленный в нашей группе, оказался очень востребованным при изучении Койперовских тел. Статья (Belskaya et al., 2003a), доказывающая существование узкого оппозиционного пика в фазовых зависимостях блеска этих тел и обратившая внимание на важность его учета при анализе данных, вызвала большой интерес. Оппозиционный эффект может являться причиной изменения амплитуды кривых блеска, что наблюдалось у некоторых тел. При этом исчезает необходимость привлекать сенсационные выводы о необычной кометной активности этих тел (например, [18]). Измерения фазовой зависимости блеска крупного транснептунового тела 20000 Варуна, инициированные И. Н. Бельской, показали, что на фазовых углах, меньших 0,1°, наблюдается ярко выраженный оппозиционный пик, а его амплитуда составляет 0,2 зв. вел. по отношению к линейной части фазовой зависимости (рис. 2.2.11). Альbedo Варуны по результатам наземных радиометрических наблюдений оценивалось как 0,05 – 0,07 [19]. Но измеренная амплитуда оппозиционного эффекта оказалась нетипичной для темных поверхностей, поэтому было высказано предположение о более

высоком альбедо этого объекта (Belskaya et al., 2006). Данные новых радиометрических наблюдений Варуны с помощью космического телескопа Spitzer подтвердили это предположение, указав наиболее вероятный диапазон значений альбедо от 0,08 до 0,23. Большие погрешности в определении альбедо ТНО традиционным радиометрическим методом связаны прежде всего с низкой температурой их поверхности $\sim 30 \div 50^\circ\text{K}$ и, соответственно, низкой тепловой эмиссией. Поэтому, возможность оценки альбедо ТНО фотометрическим методом по амплитуде оппозиционного эффекта вызывает большой интерес.

Первые поляриметрические наблюдения ТНО показали перспективность использования этого метода в изучении физических свойств их поверхностей. Несмотря на близость к нулю и небольшой диапазон значений фазовых углов, доступных наземным наблюдениям, измеренные значения степени линейной поляризации оказались велики. Наиболее интересный результат получен по наблюдениям Кентавра 2060 Хирон, проведенным в трех стандартных BVR-полосах в диапазоне фазовых углов $1,4 - 4,2^\circ$ (Bagnulo et al., 2006). Эти наблюдения выявили ярко выраженную отрицательную ветвь поляризации с минимумом, достигающим $1,4 - 1,5\%$ на фазовых углах $1,5 - 2,0^\circ$. Ни одно из других малых тел Солнечной системы не показывает такую высокую степень отрицательной поляризации на таких фазовых углах. Возможно, что фазовая зависимость поляризации Хирона является очень асимметричной с минимумом, смещенным к малым фазовым углам. В настоящее время поляриметрические наблюдения проведены только для 4-х ТНО разных динамических классов. Несмотря на малочисленность наблюдательных данных, они свидетельствуют о разнообразии свойств поверхностей этих объектов, существенно отличающихся от поверхностей астероидов главного пояса.

Изучение физических свойств транснептуновых объектов находится в начальной стадии, хотя нужно отметить, что популяция ТНО изучена значительно лучше по сравнению с нашими знаниями об астероидах главного пояса в то время, когда их было открыто примерно столько же. В настоящее время это наиболее быстро развивающаяся область исследований в современной науке о Солнечной системе, и наша Харьковская группа активно в них участвует.

Заключение

Таким образом, 30 лет назад на АО ХГУ впервые в Советском Союзе были начаты систематические исследования малых планет-астероидов, которые успешно продолжаются и сейчас. К настоящему времени тематика исследований существенно расширилась, и Харьковская группа стала одной из наиболее активных групп в Европе в исследовании малых тел. В этот ограниченный по объему обзор вошла лишь небольшая часть наших результатов, которые, как надеются авторы, будут давать последующим поколениям астрономов-исследователей нашего Института представление о том, какими интересами мы жили и чем занимались на рубеже двух тысячелетий. Хочется, чтобы у читателя создалось верное представление о том, что мы в своих исследованиях не были изолированной группой, а находились, так сказать, «в центре событий» мировой науки о малых телах, а иногда и на переднем ее крае (в таких направлениях, как поляриметрия астероидов и комет; изучение оппозиционного эффекта астероидов, комет и тел пояса Койпера; рассеяние света поверхностями астероидов и атмосферами комет, таксономия комет и др.). Наши исследования ведутся в тесном сотрудничестве с учеными США, Германии, Франции, Италии, Швеции, Чехии, Польши и других стран. Это и совместные наблюдательные программы, и многочисленные совместные статьи в престижных международных изданиях, и доклады на международных конференциях. Ежегодно сотрудники нашего отдела принимают участие в 2-4 конференциях за рубежом, практически во всех конференциях и симпозиумах, посвященных исследованиям малых тел Солнечной системы. На базе нашего Института мы организовали и провели две международные Рабочие группы: «Поляриметрия комет и астероидов» в 1997 г. и «Фотометрия и поляриметрия астероидов: импульс к сотрудничеству» в 2003 г., в которых приняли участие ученые из Украины, России, Азербайджана, Монголии, Польши, Италии, Японии. Несмотря на то, что наш отдел относительно молодой, в нем уже защищено семь кандидатских диссертаций и три докторские. Результаты исследований публикуются в журналах, трудах конференций, зарубежных монографиях, представляются на международных конференциях и включаются в международные базы

данных, в создании которых есть вклад и нашей группы. В результате, Харьковская группа получила широкое международное признание, о чем свидетельствует, в частности, название астероидов в честь ее сотрудников: 3210 Lupishko, 4208 Kiselev, 8786 Belskaya, 17034 Vasylishiev, 17035 Velichko и 17036 Krugly. Кроме того, в 2001 г. чешские коллеги Р. Правец и Л. Саронова из Онджеевской обсерватории назвали открытый ими астероид в честь всей нашей группы как признание ее заслуг в изучении астероидов. Это астероид 15898 Kharasterteam (сокращение от «Kharkov asteroid team»).

Отметим, что пять из перечисленных выше семи астероидов были названы астрономом Ловелловской обсерватории (Флагстафф, Аризона) Эдвардом Боуэллом – широко известным специалистом по обнаружению и изучению астероидов. Дружба и сотрудничество харьковских астрономов с Э.Боуэллом продолжается уже 20 лет, с тех пор, как в 1987 г. он назвал один из открытых им астероидов в честь первого автора этой статьи. Он трижды посещал Харьков и наш Институт, в том числе и в январе 2005 г. для презентации астероида «10685 Kharkivuniver», который он «подарил» нашему университету к его 200-летию юбилею. А ровно через год, по приглашению ректора ХНУ проф. Бакирова В. С., он снова посетил наш университет по случаю избрания его Почетным доктором Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина.

Среди других широко известных зарубежных ученых, с которыми установлено активное сотрудничество (совместные наблюдения, публикации, доклады на конференциях и пр.) – Р. Бинзел и А. Харрис* (США), М. Ди Мартино* и А. Челлино* (Италия), А. Баруччи (Франция), К. Йокерс* (Германия), С. Кикучи* (Япония), Т. Михаловски* (Польша), П. Правец (Чехия) и др. (отмеченные звездочкой посещали НИИ астрономии).

В заключение хочется отметить, что становление независимой Украины продолжается до сих пор и протекает весьма болезненно. Это не могло не сказаться на финансировании науки и ее состоянии, особенно в системе Министерства образования и науки. Из-за недостатка финансирования численность нашей группы (отдела) сократилась из 8-ми до 6 человек (в 2006 г. д.ф.-м.н. Н. Н. Киселев перешел на работу в ГАО НАНУ, к.ф.-м.н. В. Г. Шевченко по основной работе – на кафедру астрономии, а Т. А. Лупишко в 2003 г. – на пенсию). В этой ситуации трудно говорить о перспективах развития исследований нашей группы, как и всего НИИ астрономии. Можно только отметить, что среди ближайших наших задач стоит модернизация и автоматизация имеющегося телескопа АЗТ-8 и расширение взаимовыгодного сотрудничества с зарубежными коллегами с целью использования более мощных и современных средств наблюдений.

Литература

- [1] *Harris A. W., Pravec P.* Rotational properties of asteroids, comets, and TNOs // In: *Asteroids, Comets, Meteors* (D. Lazzaro, S.F. Mello, J.A. Fernandez – eds.). Cambridge Univ. Press, UK. – 2006. – P. 439-447.
- [2] *Stuart J. S., Binzel R. P.* Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects // *Icarus*. – 2004. – V. 170, No. 2. – P. 295-311.
- [3] *Гафтонюк Н. М.* Периоды вращения и двойственность избранных астероидов. Дисс. канд. физ.-мат. наук. – Симеиз, 2005. – 129 с. - (Машинопись).
- [4] *Dollfus A., Mandeville J.C., Duseaux M.* The nature of the M-type asteroids from optical polarimetry // *Icarus*. – 1979. – V. 37, No. 1. – P. 124 -132.
- [5] *Harris A.* Asteroid rotation. II. A theory for the collisional evolution of rotation rates // *Icarus*. – 1979. – V. 40, No. 1. – P. 145-153.
- [6] *Rivkin A. S., Howell E. S., Britt D. T. et al.* 3- μ m spectrophotometric survey of M- and E-class asteroids // *Icarus*. – 1995. – V. 117, No. 1. – P. 90-100.
- [7] *Rivkin A. S., Lebofsky L. A., Britt D. T., Howell E. S.* Three-micron survey of E- and M-class asteroids: final results // *Bull. Amer. Astron. Soc.* – 1997. – V. 29, No. 3 – P. 972-973.
- [8] *Busarev V. V.* Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // *Icarus*. – 1998. – V. 131, No. 1. – P. 32-40.
- [9] *Thomas P. C., Binzel R. P., Gaffey M. J. et al.* Impact excavation on asteroid 4 Vesta: Hubble Space Telescope results // *Science*. – 1997. – V. 277. – P. 1492-1495.
- [10] *Degewij J., Tedesco E., Zellner B.* Albedo and color contrast on asteroid surfaces // *Icarus*. – 1979. – V. 40, No. 2. – P. 364-374.

- [11] *Tedesco E. F., Veeder G. J.* IMPS albedos and diameters catalog (FP 102) / IRAS Minor Planet Survey / Eds.: E.F.Tedesco, G.J.Veeder, J.W.Flower, Chillemi J.R. – Hanscom Air Force Base, MA (USA). – 1992. – P. 243-285.
- [12] *Lagerkvist C.-I., Piironen J., Erikson A.* Asteroid Photometric Catalogue. – 2002. Fifth Update, Uppsala Univ. Press, Uppsala.
- [13] *Levasseur-Regourd A.-C., Hadamcik E., Renard J. B.* Evidence for two classes of comets from their polarimetric properties at large phase angles // *Astron. Astrophys.* – 1996. – V. 313. – P. 327-333.
- [14] *Hadamcik E., Levasseur-Regourd A.Ch.* Imaging polarimetry of cometary dust: different comets and phase angles // *JQSRT.* – 2003. – V. 79-80. – P. 661-678.
- [15] *Лебединец В. Н.* О CHON-частицах в межпланетном пространстве // *Астрон. вестник.* – 1991. – Т. 25, № 1. – С. 65-70.
- [16] *Dollfus A.* Polarimetry of grains in the coma of P/Halley. II. Interpretation // *Astron. Astrophys.* – 1989. – V. 213. – P. 469-478.
- [17] *Mason C. G., Gehrz R. D., Jones T. J., et al.* Observations of unusually small dust grains in coma of comet Hale-Bopp C/1995 O1 // *Astrophys. J.* – 2001. – V. 549. – P. 635-646.
- [18] *Hainaut O. R., Delahodde C. E., Boehnhardt H. et al.* Physical properties of TNO 1996 TO66. Lightcurves and possible cometary activity // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 356. – P. 1076-1088.
- [19] *Lellouch, E., Moreno, R., Ortiz, J. L. et al.* Coordinated thermal and optical observations of transneptunian object (20000) Varuna from Sierra Nevada // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 391. – P. 1133-1139.

2.3. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВЕНЕРЫ, МАРСА, ЮПИТЕРА И САТУРНА

к.ф.-м.н. Ю. В. Александров

Планеты Солнечной системы издавна являются важным объектом изучения в астрономии и естествознании в целом, хотя задачи и методы планетных исследований и их место в системе научного знания в разные эпохи были различными. С начала XX века главным стало изучение физических и физико-химических свойств планет.

Начало планетных исследований в Харьковском университете связано с именем академика В. Г. Фесенкова. Будучи студентом, он выполнил визуальные наблюдения Юпитера, результаты которых были опубликованы в Записках Харьковского университета. После окончания университета в 1911 г. и зарубежной командировки (до 1915 г.), где В. Г. Фесенков занимался в основном изучением природы зодиакального свечения, он снова обратился к исследованию Юпитера, результатом чего стал его фундаментальный труд «О природе Юпитера», вышедший в свет в 1917 г. (рис. 2.3.1).

Рассмотрению этого труда представляется целесообразным предпослать предисловие к нему, отражающее состояние планетоведения в то время, когда начиналось изучение планет в обсерватории Харьковского университета:

«Наши сведения о природе небесных тел находятся еще в самом зачаточном состоянии. Не говоря уже про чуждые нам миры, о которых мы не знаем почти ничего, даже о нашей планетной системе мы имеем лишь немного прочно установленных данных, относительно которых голоса наблюдателей не расходятся между собою.

Планета Юпитер, благодаря своей величине и удобному положению на небе привлекающая внимание наблюдателей со времен Галилея и особенно Дж. Кассини, изучена лучше, чем какая-либо из других планет.

Несмотря на это, до сих пор не только не существует какой-либо гипотезы, объясняющей совокупность происходящих на нем процессов, но не достигнуто согласия наблюдателей относительно достоверности многих существенных пунктов. Вследствие этого является, по моему мнению, весьма желательным обозреть критически главнейший наблюдательный материал, установить, что может в нем считаться достоверным, и на полученном таким образом фундаменте построить рациональную гипотезу, связывающую воедино различные особенности этой планеты.

В предлагаемой работе я пытаюсь выполнить указанную задачу. Сначала я излагаю современное состояние наших сведений о размерах, вращении и разных физических свойствах Юпитера, присоединяя и свои исследования о распределении интенсивности в экваториальной зоне этой планеты и о свойствах ее атмосферы. Далее я набрасываю теорию экваториального ускорения Юпитера и даю гипотезу образования различных форм, наблюдаемых на его поверхности».

Исследуя вопрос о размерах Юпитера, В. Г. Фесенков не только приводит и сопоставляет между собой результаты измерений экваториального диаметра и величины сжатия этой планеты, но и обсуждает возможное влияние на эти результаты распределения яркости по ее диску и его изменения в ходе цикла солнечной активности. Столь же тщательно анализируются им и данные о широтной зависимости угловой скорости осевого вращения Юпитера, полученные различными наблюдателями по движению деталей, видимых на диске планеты. Сделан вывод, что достаточно надежными являются лишь периоды, найденные А. А. Белопольским (9^h50^m для широт от 0° до 5° и 9^h55^m для зоны от 10° до 45°). Затем следуют описания и анализ видимой поверхности Юпитера – его зон и полос, отдельных образований в них, в частности, описывается изменение положения и вида Большого Красного Пятна. Отмечается изменение вида Юпитера с фазой цикла солнечной активности. Далее проводится теоретический анализ возможностей изучения атмосферы Юпитера по сопоставлению визуальных и спектроскопических лучевых скоростей и по покрытиям атмосферой планеты ее спутников.

Самой важной и оригинальной частью работы являются результаты впервые осуществ-

вленных В. Г. Фесенковым измерений распределения яркости вдоль экваториальной зоны Юпитера. Они были проведены в октябре 1916 г. с помощью визуального фотометра с фотометрическим клином. На основе этих измерений была предпринята попытка определения показателя прозрачности в атмосфере Юпитера в предположении, что в атмосфере имеет место рэлеевское рассеяние.

Теория экваториального ускорения Юпитера, развитая В. Г. Фесенковым, учитывает дифференциальное изменение осевого вращения небесного тела в ходе его остывания. Здесь существенным является эволюционный подход к рассматриваемой проблеме.

Конечно, сегодня результаты этого труда В. Г. Фесенкова имеют чисто исторический интерес, но он сыграл важную методическую роль в последующем развитии планетных исследований. Подтверждением этого может служить следующее содержащееся в нем высказывание: *«Для выработки рациональной теории форм на Юпитере требуется, прежде всего, основательное знакомство с целым рядом естественно-научных дисциплин, как небесная механика, фотометрия, термодинамика, математическая метеорология, геология и др., что за редкими исключениями превышает силы отдельных лиц»*.

В 1919 г. началась многолетняя научная деятельность Н. П. Барабашова.

К этому времени он уже имел значительный опыт визуальных наблюдений планет, отраженный в ряде публикаций. В первое десятилетие Н. П. Барабашов занимался изучением самых разных астрономических объектов. Но уже тогда им был выполнен ряд важных работ по планетной тематике.

В 1919 и в 1923 годах Н. П. Барабашов выполнил поверхностную фотометрию диска Венеры несколько модифицированным методом В. Г. Фесенкова. Измерения проводились в полном видимом диапазоне и со стеклянными светофильтрами – красным (605 – 660 нм) и зеленым (475 – 530 нм). Было показано, что имеет место потемнение к краю, более сильное в красных лучах, нежели в зеленых, и что распределение яркости по диску планеты не может быть описано простыми законами отражения; это свидетельствовало о существенной роли рассеяния света в плотной атмосфере Венеры в формировании этого распределения.

В 1920, 1924 и 1926 годах Н. П. Барабашов выполнил визуальные наблюдения Марса с помощью построенного им 27-см рефлектора. Наблюдения проводились с использованием пяти светофильтров (красного, зеленого, желтого, синего и фиолетового). Выполнялись зарисовки планеты, после чего проводились относительные оценки видимого альбедо различных образований на диске планеты в различных фильтрах путем сравнения яркости этих образований с яркостью какой-либо одной детали, выбранной в качестве опорной. Была прослежена эволюция полярных шапок Марса (рис. 2.3.2), описано изменение вида некоторых других образований, в частности, Solis Lacus. По характеру видимости в различных фильтрах светлые образования, появлявшиеся на диске Марса, были классифицированы следующим образом: 1) как светлые области на поверхности планеты, окруженные или покрытые облаками; 2) твердые осадки типа инея или туманоподобные образования и 3) облачные образования в атмосфере. Особенно часто облака наблюдались на утреннем и вечернем краях диска Марса. Наблюдались и темные линейные образования, так называемые «каналы». Их особенностью было то, что их видимость очень сильно варьировалась от видимости во все ночи наблюдений в данное противостояние до полной невидимости их в другие противостояния.

К концу 1920-х годов научные интересы Н. П. Барабашова сосредотачиваются на изучении физических условий на Луне и планетах. Он убедился в том, что Луна и планеты как яркие объекты вполне доступны для исследования относительно скромными наблюдательными средствами небольшой университетской обсерватории, а, познакомившись с трудами К. Э. Циолковского, понял то, какую важную роль этим исследованиям предстоит сыграть в ходе будущего освоения космоса человеком. Был, таким образом, определен объект исследований. Был выбран их метод – поверхностная фотографическая фотометрия. Совершенствовалась ее методика. Была выбрана стратегия исследований – получение длительных рядов наблюдений в различных участках видимого спектра, позволявших изучать зависимости яркости видимых планетных поверхностей от условий наблюдения и сопоставлять их с лабораторными аналогами, а затем переходить к физическим свойствам поверхностей и атмосфер планет. В этих работах стали принимать участие ученики Н. П. Барабашова. Все это означало, что начала формироваться новая научная школа – харьковская школа планетоведения.

Первой работой, выполненной методом фотографической фотометрии, была работа по фотометрии диска Юпитера по фотографиям, полученным Г. А. Шайном на 125 см рефлекторе КрАО по просьбе Н. П. Барабашова. В 1932 г. начались фотографические наблюдения планет в АО ХГУ. В этом году была осуществлена фотометрия Венеры в трех фильтрах (синем, желтом и красном). Марс впервые фотографировался в 1933 г. с теми же тремя фильтрами. Большая программа наблюдений Марса была выполнена в 1939 г. Применялись только два фильтра – красный и синий, в период с июня по сентябрь было получено более 1000 изображений планеты. Фотометрия Юпитера проводилась в 1932 – 1935 и 1938 г.г. также в синих и красных лучах. С теми же фильтрами фотографировался Сатурн ежегодно с 1932 по 1938 год. Наблюдения проводились на 20 см рефракторе Цейсса и находящемся с ним на одной параллактической установке 27 см рефлекторе.

Выводы, которые делались в результате анализа этих наблюдений, были зачастую лишь качественными. Некоторые из них оказывались, как выяснилось впоследствии, неверными. Попытки количественной интерпретации основывались на простейших моделях. Для видимых поверхностей планет использовались лишь законы отражения Ламберта и Ломмеля-Зеелигера или их некоторые простые обобщения. Рассеяние в атмосферах описывалось законом Рэлея с учетом лишь рассеяния первого порядка или формул Э. Шенберга, учитывающих рассеяние Рэлея первых двух порядков. Тем не менее 1930-е годы были весьма важным этапом в развитии у нас планетных исследований. Это была, если можно так выразиться, «эпоха первоначального накопления капитала», точнее говоря, накопления опыта в изучении планет методом фотографической фотометрии. Анализировались источники ошибок при проведении наблюдений и их обработке. Разрабатывались методики, позволявшие их уменьшить и учитывать. Определялись наилучшие режимы фотографической обработки фотопластинок, опробовались различные способы их калибровки и стандартизации. Для учета погрешностей, вносимых оптикой телескопов и фотографическим процессом, Н. П. Барабашовым был в 1932 г. предложен метод искусственной планеты, для чего фотографировался ортотропно отражающий экран с угловыми размерами, соответствующими размерам исследуемой планеты. Были предприняты и первые попытки сопоставления результатов фотометрии планет, в частности Марса, с данными для естественных и искусственных поверхностей. В этих работах кроме Н. П. Барабашова принимали участие Б. Е. Семейкин, В. Д. Фурдыло, И. Ф. Тимошенко. Кроме наблюдательных работ были сделаны работы, посвященные анализу и обобщению накопленного наблюдательного материала. Это работы Н. П. Барабашова 1940 г. по Марсу, В. Д. Фурдыло 1939 г. по Сатурну, В. И. Езерского 1948 г. по Венере.

Из конкретных результатов, полученных в то время, упомянем следующие. Для Венеры было установлено наличие значительного фазового хода показателя цвета. Было обнаружено, что распределения яркости по дискам Венеры и планет-гигантов плохо представляются указанными выше простыми моделями. Для материков Марса эти распределения, особенно в длинноволновой части спектра, удовлетворяют закону Ламберта. Были получены для видимой области спектра оценки альbedo различных образований на марсианской поверхности – материковых и морских областей, полярных шапок и светлых деталей. Были также накоплены данные о сезонных вариациях альbedo и их зависимости от условий освещения поверхности Солнцем. Была сделана оценка атмосферного давления на Марсе $p_0 \approx 65$ мб. Эта оценка завышена на порядок в силу неучета рассеяния света атмосферными аэрозолями, но тем не менее она оказалась значительно ближе к действительности, нежели значения, даваемые в то время зарубежными исследователями (например, 300 мб).

Практически важным выводом из проделанной работы было то, что для успеха дальнейших исследований необходимо переходить к наблюдениям планет с помощью более крупных телескопов в астроклиматических условиях, лучших, нежели эти условия могут быть в центре большого города. Но осуществить такой переход удалось уже только после Великой Отечественной войны.

В послевоенное время наблюдения планет возобновились в 1949 г. после восстановления башни цейссовского телескопа. В этом году А. Т. Чекирда провел спектральные наблюдения Венеры с объективной призмой и надежно подтвердил наличие фазового хода показателя цвета этой планеты.

В 1951 – 1954 г.г. В. И. Езерский выполнил большую работу по фотографической фотометрии Венеры. Фотографирование планеты проводилось на рефракторе Цейсса в 1951, 1953, 1954 г.г. Использовалась специальная насадка для экранирования прямых

солнечных лучей и яркого фона неба вблизи Солнца. Выполнялось диафрагмирование поля зрения для устранения фона неба при фотографировании ряда изображений Венеры на одной и той же пластинке (от 15 до 20 изображений). Использовались четыре светофильтра – красный, желтый, зеленый и синий. Всего было отснято более 200 пластинок и получено несколько тысяч изображений Венеры. Окончательно для дальнейшей обработки было отобрано 12 пластинок в интервалах углов фазы $26,0 - 49,3^\circ$ и $77,6 - 138,7^\circ$. Измерения снимков проводились на микрофотометре МФ-2. Каждое изображение фотометрировалось в пяти направлениях – вдоль экватора интенсивности и вдоль четырех параллельных и симметричных относительно него направлений. Для всех измеренных точек на диске планеты были рассчитаны значения углов падения и отражения света и разности азимутов падающего и отраженного лучей. Кроме того, были аналогичным образом переобработаны фотографические наблюдения Венеры Н. П. Барабашова 1932 г. (4 пластинки). Сделано это было в связи с систематическими расхождениями между результатами обработки этих наблюдений на микрофотометрах Коха и Гартмана.

В результате анализа полученного наблюдательного материала было, прежде всего, обнаружено, что во всех случаях максимум яркости на кривых распределения яркости располагается вблизи точки с равными друг другу углами падения и отражения света. Это было объяснено В. И. Езерским наличием зеркального эффекта при отражении света от облачного слоя Венеры наряду с диффузным рассеянием света. Были также сопоставлены между собою ветви кривых распределения яркости со стороны лимба и со стороны терминатора. В силу принципа взаимности после учета в различиях углов падения и отражения соответствующих точек на диске планеты эти ветви должны были бы совпадать. Однако обнаружилось, что систематически терминаторная ветвь лежит выше ветви кривой со стороны лимба. Таким образом, подтвердился эффект, ранее обнаруженный Миннаертом. Ни Миннаерт, ни Езерский не дали какого-либо объяснения этому эффекту. Позже В. Н. Дудинов показал, что различие хода терминаторной и лимбовой ветвей объясняется влиянием турбулентного замытия изображения планеты земной атмосферой. Была сделана, затем, попытка определить индикатрису рассеяния света в облачном слое атмосферы Венеры с помощью приближенных формул В. В. Соболева. Была определена индикатриса в пределах углов рассеяния от 30 до 180° . Качественное сходство полученной индикатрисы с индикатрисой рассеяния капель воды привело В. И. Езерского к выводу о водной природе облачного слоя на Венере. К сожалению, этот вывод оказался ошибочным; он явился следствием малой информативности кривых распределения яркости при имевшемся наборе фазовых углов.

Исследования Венеры были продолжены в 1964 г. О. М. Стародубцевой. Фотографирование Венеры проводилось на 27 см рефлекторе АО ХГУ с двумя интерференционными фильтрами ($\lambda\lambda$ 440 и 527 нм) и стеклянными фильтрами УФС-3+СЗС-7, что дало $\lambda_{\max} = 370$ нм. За период январь – октябрь 1964 года было получено около 150 пластинок с примерно 1500 изображениями Венеры. Было обработано 70 лучших изображений, охватывавших интервал углов фазы от 71° до 122° . Фотометрирование этих изображений было выполнено на микрофотометре МФ-4 вдоль экватора интенсивности и вдоль ряда направлений, перпендикулярных экватору интенсивности, с окошком размером $1,3'' \times 1,3''$. Фотографическая спектрофотометрия Венеры проводилась на телескопе АЗТ-2 ГАО АН Украины со спектрографом АСП-21 и спектральным разрешением 1,5 ангстрема в области 350 – 500 нм. Щель ориентировалась вдоль экватора интенсивности и в двух перпендикулярных ему направлениях – вдоль терминатора и посередине освещенной части планеты. Всего было получено 74 спектрограммы Венеры, из них 54 – с привязкой к центру диска Солнца. Результаты обработки 17 спектрограмм представлены в виде относительных распределений яркости по диску Венеры и в виде десятичного логарифма отношений яркости поверхности Венеры к яркости центра солнечного диска.

При последующей обработке результатов наблюдений О. М. Стародубцевой был проведен анализ влияния на эти результаты замытия земной атмосферой. Рассчитывались свертки определенных по формулам В. В. Соболева распределений яркости по диску Венеры с гауссовой функцией и проводилось их сравнение с наблюдаемыми кривыми. Показано, что наименее искажаются части кривых распределения яркости со стороны терминатора. Были снова выявлены нарушения принципа взаимности между ветвями кривых распределения яркости со стороны лимба и терминатора и квазизеркальный эффект в этих распределениях, а также установлена связь этих эффектов с турбулентным замытием

изображений земной атмосферой. Исследовались свойства темных образований, видимых на диске Венеры в ультрафиолетовых и иногда в синих и зеленых лучах. Оценивался их контраст и его поведение, установлено увеличение этого контраста к терминатору. Качественно была проанализирована возможность появления темных образований в связи с изменением размера аэрозолей под влиянием изменения температуры или выброса частиц с поверхности планеты. Была изучена возможность определения оптических параметров атмосферы Венеры по данным ее поверхностной фотометрии в различных диапазонах углов фазы.

В дальнейшем внимание О. М. Стародубцевой было сосредоточено на изучении контрастов УФ-образований, видимых на диске Венеры. Фотографическая спектрофотометрия была проведена ею в 1969 и 1972 годах. В 1980 году были осуществлены измерения степени поляризации света, отраженного Венерой фотографическим методом в пяти длинах волн от 320 до 630 нм. В результате был подробно изучен спектральный ход этих контрастов. Анализ времени вариаций контрастов в интенсивности и в степени поляризации показал наличие их периодичности с периодом в 4,3 – 4,5 суток, что явилось подтверждением существования четырехсуточной циркуляции в верхней атмосфере Венеры (рис. 2.3.3).

Исследования Марса были возобновлены в 1946 г. работой Н. П. Барабашова по анализу большого массива визуальных наблюдений планеты (его собственных и выполненных ранее Е. Антониади). Изучались сезонные изменения различных марсианских образований и зависимость их яркости и цвета от высоты Солнца над горизонтом. В 1950 и 1952 г.г. Н. П. Барабашовым и А. Т. Чекирдой были продолжены фотографические наблюдения Марса со светофильтрами.

В противостояние Марса 1954 г. большую работу по абсолютной поверхностной фотометрии Марса выполнил И. К. Коваль. Фотографирование планеты проводилось на рефракторе Цейсса со специальной лунно-планетной камерой с мая по сентябрь. Калибровались снимки рассеянным солнечным излучением. Стандартизация производилась по внефокальным изображениям звезды α Boo, полученными с теми же экспозициями, что Марс. Использовались четыре светофильтра – синий, желтый, зеленый и красный. На микрофотометре МФ-2 измерялись распределения яркости в материковых областях Марса вдоль экватора интенсивности и вдоль радиусов планеты в ее южном полушарии под углами в 45° и 135° к этому экватору. Исследовалось 18 участков в морских областях и ряде точек в полярных шапках. Затем были построены кривые распределения яркости в «усредненном море» Марса. Была подтверждена близость распределения яркости материков Марса к закону Ламберта и установлено заметное отклонение от него для морских областей.

Обработка результатов наблюдений была проведена И. К. Ковалем по приближенным формулам В. В. Соболева, обобщенным для закона отражения света от поверхности планеты, предложенного Н. Н. Сытинской. Использовалась индикатриса рассеяния света земной атмосферой. Фактор гладкости q оказался близок к 1 для материка и равным 0,7 для морей. Изменения по спектру распределений яркости со временем связаны с вариациями оптической толщины атмосферы. Морские области оказалось возможным разбить на три группы, в зависимости от спектрального хода контраста по сравнению с материком и зависимости их цвета от полуденной высоты Солнца.

Естественно, что Марс оказался предметом тщательного изучения Н. П. Барабашовым и И. К. Ковалем в великое противостояние 1956 г. Наблюдения проводились с середины июня до конца ноября и включали визуальные наблюдения планеты на рефракторе Мерца, а также определение прозрачности земной атмосферы как по визуальным изображениям Марса, так и «долгим методом» по внефокальным изображениям звезд. Марс фотографировался на 27-см рефлекторе с увеличительной камерой и шестью светофильтрами, охватывавшими спектральный диапазон от 0,36 мкм до 0,81 мкм. После основной серии наблюдений в течение 30 – 40 минут вблизи кульминации Марса в течение еще 3 – 4 часов планета с интервалом в 20 минут фотографировалась в ультрафиолетовых и инфракрасных лучах с целью наблюдения отдельных деталей на поверхности Марса при разных условиях освещения Солнцем. Калибровка снимков делалась с помощью трубчатого фотометра с тщательным контролем условий проведения этой процедуры. Изображения Марса на разных пластинках связывались между собой путем фотографирования планеты на каждой пластинке в данную ночь и в следующую ночь наблюдений. Стандартизация

осуществлялась с помощью рассеивающего экрана, при этом особое внимание было уделено учету влияния рассеянного солнечного излучения. Для последующей обработки было отобрано из общего числа более чем 3000 изображений Марса около 900 изображений, полученных в 54 наблюдательных ночи. На каждом изображении измерялись на микрофотометре МФ-2 яркости в среднем по 50 точек на диске планеты, расположенных в различных образованиях, видимых на поверхности Марса.

Результаты измерений представлены в виде каталога значений яркостного фактора во всех измеренных точках. Для каждой даты и каждого фильтра указываются угол фазы и долгота центрального меридиана, а для каждой точки ее ареоцентрические координаты и значения углов падения и отражения света. Кроме того, для 42 дат были построены распределения яркости вдоль экватора интенсивности и центрального меридиана. Составлены были выборки значений яркостного фактора для светлых областей, наблюдавшихся на планете, для морей экваториальной зоны и для южной полярной шапки Марса. Анализ изменения яркости этой полярной шапки позволил предположить, что она имеет и поверхностную, и атмосферную составляющие. Определена была также кривая изменения широты границы южной полярной шапки в течение весенне-летнего сезона на Марсе. Получены кривые среднего спектрального хода отражательной способности материковых и морских областей Марса. Сделана оценка минимальных, средних и максимальных значений контраста «море – материк». По данным в красной и инфракрасной области спектра, полученным при максимальной прозрачности, определялись значения фактора гладкости. Они оказались около 0,9 – для материков и 0,6 для морей. Были определены также временные вариации альбедо морей Марса (рис. 2.3.4).

Фотографическая фотометрия Марса была продолжена Н. П. Барабашовым, И. К. Ковалем и А. Т. Чекирдой в 1958 году.

Обширный цикл исследований Марса был выполнен в его великое противостояние 1971 года и в последующие за ним противостояния 1973 и 1975 г.г. Программа наблюдений Марса в 1971 г., разработанная под руководством Н. П. Барабашова, предусматривала:

1) Фотоэлектрические измерения интегрального блеска Марса и яркости центра диска в интервале длин волн от 366 нм до 717 нм с пятью интерференционными фильтрами и фотоэлектрические привязки звезд сравнения к фотометрическому стандарту α Aug; период наблюдений: июнь – октябрь и декабрь.

2) Фотографирование Марса со стеклянными светофильтрами в области спектра с $\lambda_{эфф} = 366 - 625$ нм; период наблюдений: июнь – октябрь. Фотографические наблюдения Марса сопровождалось измерениями величины турбулентного дрожания земной атмосферы для оценки качества изображения планеты.

В связи со значительным отрицательным склонением Марса в 1971 г. наблюдения проводились на телескопе АЗТ-8 самой южной в СССР Гиссарской обсерватории Института астрофизики АН Таджикистана. Общее количество наблюдательных ночей фотоэлектрических наблюдений – 38 в июне – октябре и 3 в декабре, в период выхода на ареоцентрическую орбиту АМС «Марс-2 и -3». Влияние прозрачности атмосферы исключалось методом равных высот по звездам ϵ и ζ Car. Величина атмосферного дрожания находилась по измерениям потока от звезды, проходящей через ножевую диафрагму; среднеквадратичное значение σ лежало в пределах от 1,3" до 3,8" со средним значением 2,4". Фотоэлектрические измерения интегрального блеска Марса были продолжены на телескопе АЗТ-8 Чугуевской наблюдательной станции АО ХГУ в противостояния 1973 г. (40 наблюдательных ночей) и 1975 года (59 ночей). Наблюдения Марса были выполнены Д. Ф. Лупишко и Т. А. Лупишко, их обработка – Д. Ф. Лупишко и Т. А. Лупишко, а интерпретация – Ю. В. Александровым и Д. Ф. Лупишко.

При фотографических наблюдениях в каждом фильтре с различными экспозициями получались по 18 изображений планеты (1 или 2 пластинки за ночь). За 37 наблюдательных ночей с общим периодом в 4 месяца, т.е. за время трех полных оборотов Марса относительно земного наблюдателя, было получено более 2500 изображений планеты. В период наблюдений с середины июня до середины сентября прозрачность атмосферы Марса была достаточно высокой, во второй половине сентября видимость деталей на диске планеты начала ухудшаться, и к началу октября планету охватила глобальная пылевая буря, продолжавшаяся до начала января 1972 г. Однако наблюдались отдельные прояснения, через промежутки времени, примерно соответствующие времени жизни крупных аэрозоль в атмосфере Марса. Наблюдения 1973 г. охватили период средней прозрачности марсиан-

ской атмосферы и период развития глобальной пылевой бури, по всей вероятности, еще более мощной, чем в 1971 г. В 1975 г. наблюдалось затухание глобальной пылевой бури. Таким образом, в перигелийное (великое) противостояние Марса 1971 г. и в последующие близперигелийные противостояния 1973 и 1975 г.г. на Марсе имели место глобальные пылевые бури. На рис. 2.3.5 хорошо прослеживается влияние пылевой бури на фазовые зависимости блеска Марса в 1971 г.

После абсолютизации измерений интегрального блеска Марса было проведено исключение долготного эффекта в блеске планеты, достигавшего в красных лучах величины $0,15^m$ и четко коррелировавшего с количеством разноальбедных деталей на видимом полушарии Марса. Главным результатом интегральной фотометрии Марса явились характерные и достаточно значительные изменения интегрального блеска планеты во время пылевой бури по сравнению с периодом нормального состояния ее атмосферы – возрастание блеска планеты во время пылевой бури в зеленой и, особенно, в красной части спектра с его уменьшением в ультрафиолетовых лучах. Это объясняется, помимо невидимости низкоальбедных деталей, увеличением альбеда однократного рассеяния частицами пыли, поднятыми в атмосферу, по сравнению с его значением, когда они лежат на поверхности, и отсутствием в первом случае теневого эффекта. В ультрафиолете же отсутствует первая причина и возрастает поток отраженного излучения за счет увеличения вытянутости индикатрисы рассеяния света пылью в связи с ростом параметра Ми. Эти результаты были подтверждены нашими наблюдениями 1973 и 1975 г.г., а также данными КА «Маринер-9» в феврале 1972 г.

Затем была проведена обработка всех имевшихся результатов по интегральной фотометрии Марса. Кроме наших наблюдений 1971 – 1975 г.г. были использованы ряды фотоэлектрических наблюдений В. Ирвина и др. (1963 – 1967 г.г., $\lambda\lambda$ 313 – 1064 нм), Л. А. Бугаенко и др. (1967 г., $\lambda\lambda$ 335 – 619 нм), фотографических спектрофотометрических наблюдений Р. Вулли (1954 г., $\lambda\lambda$ 405 – 636 нм) и наблюдения, проведенные нашим аспирантом Н. Б. Ибрагимовым в 1960 – 1961 г.г. на телескопе АЗТ-7 Шемахинской астрофизической обсерватории АН Азербайджана со спектрографом АСП-9 в том же спектральном интервале, что и у Р. Вулли. Все эти данные были усреднены с соответствующими весами и интерполированы на значения длин волн от 350 нм до 1050 нм с шагом в 50 нм. Затем зависимости блеска Марса от угла фазы (в интервале от 3° до 45°) были аппроксимированы полиномами Чебышева (ранее проводилась лишь линейная их аппроксимация). Оказалось при этом, что эти фазовые зависимости описываются квадратичными параболой с возрастанием нелинейности в коротковолновую область спектра и лишь в ультрафиолете можно оценить и кубический их член. Найдены были также значения геометрического альбеда Марса.

Из полученных фотографических изображений Марса были отобраны 64 лучших по качеству изображения за 17 дат, равномерно распределенных по углу фазы. Отобранные изображения были профотометрированы на микрофотометре МФ-4 ГАО АН Украины, модифицированном выпускником нашей кафедры В. Г. Парусимовым для измерений непосредственно в интенсивностях. При измерениях размер диафрагмы несколько превышал величину разрешения так, что разные изображения приводились к примерно одинаковому разрешению в $1''$. На изображении снималось от 300 до 900 отсчетов в зависимости от углового размера планеты (от $15''$ до $25''$). По результатам измерений были построены системы изофот на диске Марса (см., например, рис. 2.3.6). Стандартизация полученных изофот проводилась путем сопоставления фотоэлектрических измерений интегрального блеска Марса с его относительными оценками, найденными численным интегрированием распределения яркости на изображениях планеты, и контролировалась сравнением с фотоэлектрическими измерениями яркости центра диска Марса. Проведенная оценка точности абсолютной поверхностной фотометрии Марса составила для центральной части диска планеты 3 – 5%.

Н. Б. Ибрагимовым была сделана оценка оптических параметров атмосферы Марса в коротковолновой части спектра по его наблюдениям для модели полубесконечной атмосферы с индикатрисой рассеяния, полученной с помощью приближенных формул В. В. Соболева. Получены были значения вероятности выживания кванта ω , равные 0,55 для $\lambda = 405$ нм, 0,60 для $\lambda = 455$ нм, и значения параметра вытянутости индикатрисы рассеяния x_1 , равные 1,45.

При интерпретации наблюдений Марса 1971 года была поставлена задача определения свойств частиц, образующих явление пылевых бурь на Марсе. Рассмат-

ривалось два случая – «малые частицы» (≈ 1 мкм) и «большие частицы» (≈ 10 мкм). Отсутствие контрастов на диске планеты позволяло при расчетах отраженного излучения полагать оптическую толщину атмосферы $\tau = \infty$. Индикатриса рассеяния света представлялась согласно Г. ван-де Хюлсту взвешенной суммой простейшей несферической индикатрисы и δ -функции. Веса находились по значениям параметров коэффициентов x_1 и x_2 индикатрис, рассчитанных К. С. Шифриным и И. Л. Зельмановичем для комплексного показателя преломления $m = 1,34 - 0,007i$, дающего ожидаемые значения вероятности выживания кванта ($\omega \approx 0,9$). Расчеты проводились по приближенным формулам Э. Г. Яновицкого. Для указанных выше двух случаев спектральные значения вероятности выживания кванта оказались лежащими в пределах $0,60 - 0,95$ и $0,87 - 0,99$ соответственно с ростом в длинноволновую сторону спектра. Сопоставление этих результатов с возможными значениями величины выживания кванта для частиц силикатной природы (в соответствии с данными КА «Маринер-9») привело к оценке характерного размера частиц в активной фазе пылевых бурь на Марсе в 10 мкм, что согласуется с результатами А. Дольфюса и А. В. Мороженко, полученными по поляриметрическим данным. Затем был проведен расчет спектральных значений освещенности на поверхности Марса для случаев «малых частиц» (стадия затухания пылевой бури) и «больших частиц» (максимальное развитие бури) для различных значений оптической толщины от 1 до 50 . Сопоставление соответствующих величин энергии, поглощенной пылевым слоем, с данными о разности температур на его верхней границе и у поверхности планеты, полученные КА «Марс-5», позволило оценить оптическую толщину атмосферы Марса в период пылевой бури 1971 г., равную примерно 40 . Это дает концентрацию частиц у поверхности $\approx 10 \text{ см}^{-3}$, толщину слоя осевшей пыли ≈ 1 мм и общую массу пыли, поднятой в атмосферу Марса, $\approx 10^{17}$ грамм.

В 1970-х годах был выполнен ряд прикладных работ по построению фотометрической модели атмосферы и поверхности Марса и выполнению на этой основе светотехнических расчетов, необходимых для работы систем астроориентации АМС на подлетном участке их траектории, а также работы по анализу условий работы научной аппаратуры на поверхности Марса (Ю. В. Александров, М. Ф. Ходячих, В. П. Куличкин, В. М. Литвинов).

В 1951 – 1954 г.г. большая работа по абсолютной фотографической фотометрии Юпитера и Сатурна была выполнена В. Н. Лебединцом. Ей предшествовал критический обзор ранее выполненных в этом направлении работ с анализом возможных источников помех. В ходе выполнения работы В. Н. Лебединцом был проведен учет погрешностей, вносимых в результаты наблюдений телескопом по методу искусственной планеты. В течение трех противостояний Юпитера было получено на рефракторе Цейсса около 250 пластинок с несколькими тысячами изображений Юпитера в четырех длинах волн. Масштаб изображений определялся по двойным звездам. Калибровка проводилась с помощью трубчатого фотометра, измерялись снимки на микрофотометре МФ-2. Абсолютизация наблюдений 1953 и 1954 г.г. осуществлялась двумя методами – сравнением с яркостью рассеивающего экрана и методом внефокальных изображений звезд. В. Н. Лебединец произвел также переобработку фотографических наблюдений Юпитера 1933 – 1938 г.г. Всего было получено 75 распределений яркости по диску Юпитера вдоль центрального меридиана и вдоль зон и полюсов планеты (от пяти до двух). Был найден исправленный за потемнение к краю контраст зон и полос по отношению к самой светлой зоне. Анализ полученных результатов выявил различие в состоянии атмосферы Юпитера в 1933 и 1938 годах и в 1953 – 1954 г.г. В первом случае потемнение к краю значительно уменьшается с уменьшением длины волны, во втором это уменьшение значительно меньше. В первый период распределения яркости подвержены значительным изменениям, во второй они были более стабильны. Для Сатурна были получены в каждом фильтре в 1953 – 1954 г.г. распределения яркости вдоль экватора интенсивности. Кроме того были найдены отношения яркостей кольца В к яркости центра диска планеты для 12 дат в 1953 г. и 8 дат в 1954 г. В заключение В. Н. Лебединец делает вывод о малой оптической толщине надоблачной газовой атмосферы на Юпитере в 1953 – 1954 г.г. и о значительно большем ее значении в 1933 и 1938 годах.

Изучение фотометрических свойств Юпитера было продолжено в 1960 – 1965 г.г. Ю. В. Александровым по результатам относительной фотографической фотометрии этой планеты. Им были профотометрированы и прокалиброваны наилучшие по качеству изображения Юпитера из большой серии снимков планеты в четырех светофильтрах, полученные

в 1951 – 1955 г.г. А. Т. Чекирдой, а также использованы распределения яркости по диску Юпитера, найденные В. Н. Лебединцом. Всего было построено 350 кривых распределения яркости вдоль трех светлых зон и двух темных полос, а также вдоль центрального меридиана Юпитера по 190 изображениям на 91 пластинке (отобранных из более чем 500 пластинок с более чем 5000 изображениями планеты). Прежде всего, была сделана оценка возможного влияния на полученные результаты турбулентного замытия земной атмосферой, и было показано, что для значений от центра планеты 0,85 радиуса диска это влияние не существенно. Затем был проведен спектральный анализ полученных распределений яркости с помощью полиномов Чебышева и установлено, что с достаточной надежностью определяются только линейный и квадратичный коэффициенты полиномов, описывающих эти распределения. Последующий дисперсионный анализ этих коэффициентов по фильтрам и периодам наблюдений не выявил значимых различий во времени, а по спектру от остальных отличаются только распределения яркости в синем фильтре.

Для интерпретации этих результатов наблюдений была предложена двухпараметрическая оптическая модель атмосферы Юпитера – полубесконечная слабо поглощающая атмосфера с трехчленной индикатрисой рассеяния вида $x(\gamma) = 1 + x_1 \cos \gamma + (0.5 + 0.25x_1)P_2(\gamma)$, где $P_2(\gamma)$ – второй полином Лежандра. Для этой модели были рассчитаны распределения яркости по диску планеты по приближенным формулам, основанным на точном решении задачи Чандрасекара и Горака. В результате были найдены следующие оценки оптических параметров атмосферы Юпитера: вероятности выживания кванта ω и коэффициента x_1 для светлых зон – $\omega = 0,982 \div 0,990$, $x_1 = 1,3 \div 1,5$ и для темных полос – $\omega = 0,974 \div 0,984$, $x_1 = 1,2 \div 1,5$. Для согласования этой модели с распределением яркости в синем фильтре пришлось ввести предположение о наличии надоблачного газового слоя с оптической толщиной $\tau = 0,1 \div 0,2$. Сделана была оценка среднего размера аэрозолей в атмосфере Юпитера ($\bar{a} = 0,1 \pm 0,15$ мкм при дисперсии $\sigma^2 = 0,5$). Были на этой основе рассчитаны сферическое и геометрическое альбедо Юпитера и его фазовая кривая блеска.

Серия интегральных и поверхностных спектрофотометрических наблюдений Юпитера была выполнена в 1965 – 1967 г.г. М. Ф. Ходячих на телескопе АЗТ-7 со спектрографом АСП-9 с одновременным определением коэффициента прозрачности атмосферы «долгим методом». Щель спектрографа ориентировалась вдоль оси вращения планеты. Стандартизация спектрограмм проводилась сравнением с яркостью фотосферы Солнца в 1965 г. и методом внефокальных изображений звезд в 1966 г. Всего было получено 250 спектрограмм. В 1967 г. проводилась относительная поверхностная спектрофотометрия Юпитера. В 1966 г. одновременно с поверхностной были выполнены и интегральные спектрофотометрические наблюдения планеты. Результаты этих наблюдений были исправлены за эффекты, связанные с различием экспозиций при наблюдениях Юпитера и звезд сравнения, и были найдены значения геометрического альбедо Юпитера в интервале длин волн $\lambda\lambda$ 400 – 640 нм. Они оказались согласующимися со значениями геометрического альбедо, определенными из монохроматических распределений яркости по диску Юпитера. В 1969 г. были выполнены фотоэлектрические определения яркости центра диска Юпитера с тремя стеклянными светофильтрами со стандартизацией по звездам, привязанным непосредственно к центру солнечного диска.

Интерпретация результатов этих наблюдений проводилась М. Ф. Ходячих в рамках модели оптически полубесконечной атмосферы с трехчленной индикатрисой рассеяния света, приведенной выше. Найденные значения альбедо однократного рассеяния ($\omega = 0,994 - 0,997$) были сопоставлены с результатами Ю. В. Александрова и В. В. Аврамчука. Было показано, что расхождение между этими тремя оценками альбедо однократного рассеяния частиц в облачном слое Юпитера в его экваториальной зоне может быть устранено учетом влияния надоблачной дымки с оптической толщиной газовой составляющей 0,07 (при 630 нм) и аэрозольной составляющей – 0,20. Средний радиус частиц в дымке 0,7 мкм, а количество частиц в ее вертикальном столбе 10^7 см⁻². При этом различие в спектральном ходе альбедо Юпитера (большая селективность по спектру в 1966 г. по сравнению с 1965 г.) может быть объяснено изменением среднего размера частиц надоблачной дымки.

М. Ф. Ходячих обратил также внимание на то, что энергетическое соотношение между приливным воздействием на планету со стороны ее спутников и ее инсоляцией возрастает с удалением планеты от Солнца. Он рассчитал величины приливных ускорений от Ио на поверхности Юпитера в зависимости от угла, образуемого направлениями на Ио и на Землю. Эти значения были сопоставлены с поведением оптических характеристик

центральной части диска Юпитера – изменением контрастов между зонами и полосами по наблюдениям М. Ф. Ходячих и временным ходом эквивалентной ширины полосы метана при $\lambda = 619$ нм по наблюдениям В. Г. Тейфеля и Н. В. Прибоевой в 1960 – 1961 г.г. и В. В. Аврамчука в 1963 – 1966 г.г. Обнаружена была корреляция между этими данными. Вблизи соединений Ио с Юпитером эквивалентные ширины и коэффициенты яркости центра диска планеты принимают минимальные значения. Позже М. Ф. Ходячих провел аналогичное исследование, сопоставив эквивалентные ширины той же полосы метана на Сатурне (по данным В. В. Аврамчука для 1968 – 1969 годов) с приливным ускорением от Титана, и также нашел хорошую корреляцию (в отдельные даты коэффициент корреляции составлял $0,76 \pm 0,21$).

Цикл спектрофотометрических исследований колец Сатурна выполнил А. М. Грецкий. В 1966 г. фотографические наблюдения проводились при минимальном раскрытии колец в течение 22 ночей в августе – ноябре с помощью спектрографа АСП-9 (дисперсия 143 ангстрема при H_γ) на телескопе АЗТ-8 АФИ Казахской ССР. Было получено по 66 спектрограмм Сатурна и звезды сравнения α Aql. Затем была определена отражательная способность экваториальной зоны Сатурна вместе с кольцом и найдены спектрофотометрические градиенты для $\lambda\lambda$ 410 – 450 мкм и $\lambda\lambda$ 460 – 600 мкм. В период 1970 – 1972 г.г. Сатурн наблюдался на телескопе АЗТ-8 АО ХГУ со спектрографом АСП-21 (дисперсия 30 ангстрем/мм). В течение 40 ночей было получено 140 спектрограмм. Полученные спектрограммы фотометрировались вдоль и поперек направления дисперсии на микрофотометре МФ-2 с выводом на цифропечать. Фотометрические разрезы получены в 18 длинах волн от 4016 ангстрем до 6375 ангстрем с построением характеристической кривой для каждого из более чем тысячи разрезов. По спектрограммам с лучшим пространственным разрешением было проведено детальное сравнение отражательной способности центра диска Сатурна и колец А и В, а также их западной и восточной ветвей. Для контроля поведения яркости в центре диска Сатурна проводились параллельные фотоэлектрические измерения центра диска планеты и звезды сравнения ϵ Tau с внутренней точностью определения яркостного фактора центра диска в 2%. Впервые были получены монохроматические фазовые кривые кольца В. Совместно с В. Н. Дудиновым была проведена численная линейная фильтрация с целью уменьшения влияния на результаты измерений турбулентного замытия земной атмосферой. При этом оказалось, что систематическая ошибка, уменьшающая яркость кольца В, может достигать 20%.

Основные результаты анализа полученного наблюдательного материала оказались следующими. Была выявлена зависимость опозиционного эффекта от длины волны. Обнаружена депрессия на фазовых кривых вблизи значения угла фазы 4° (рис. 2.3.7). Впервые эта депрессия была отмечена Э. Шенбергом, в работе же А. М. Грецкого ее существование было надежно установлено и изучено ее поведение по спектру. Им же это явление было интерпретировано как проявление радуги, обусловленной наличием в веществе колец Сатурна в количестве до 2% крупных сферических частиц с показателем преломления, равным 1,8. Поскольку наличие в кольцах частиц со столь высоким коэффициентом преломления весьма проблематично, описанный эффект можно отнести к необъясненному. Было также обнаружено существенное различие фотометрических свойств колец при малых и больших их раскрытиях, что позволило предположить наличие мелкодисперсной и газовой составляющих в образующем их веществе.

В последнюю четверть века планетные исследования были сосредоточены в двух направлениях. Первое – это поляриметрия Юпитера, точнее говоря, изучение асимметрии в степени поляризации света, отраженного северной и южной полярными областями Юпитера. Второе направление – изучение свойств поверхностей Венеры и Марса по данным космических экспериментов. Об этих работах рассказано в последующих очерках.

За 90 лет планетных исследований в Харьковском университете пройден большой путь. Усложнялись задачи этих исследований, совершенствовались их техника и методика, модифицировалась интерпретационная база. Развитие планетной тематики отражено в более чем 300 публикациях. По этой тематике подготовлено и защищено 16 диссертаций, опубликовано 6 монографий. Кроме труда В. Г. Фесенкова о Юпитере, это книга Н. П. Барабашова «Результаты фотометрических исследований Луны и планет на АО ХГУ» (1957 г.), в которой подведены итоги работы по изучению планет за первые сорок лет. Обобщение результатов наших исследований планет за последующие 10 лет сделано в книге Н. П. Барабашова «Об опыте фотометрирования планет» (1966 г.). Результатам изучения

Марса посвящены монографии Н. П. Барабашова и И. К. Коваля «Фотографическая фотометрия Марса со светофильтрами во время великого противостояния Марса в 1956 году» (1959 г.) и Ю. В. Александрова, Д. Ф. Лупишко и Т. А. Лупишко «Абсолютная фотометрия Марса в 1971, 1973 и 1975 г.г.» (1977 г.). В 1950 – 1960 годах особо важную роль в развитии работ по изучению планет и в подготовке новых кадров исследователей сыграла книга Н. П. Барабашова «Исследование физических условий на Луне и планетах» (1952 г.).

Стремление к максимально полному учету различных факторов, влияющих на точность результатов наблюдений планет, присущее харьковской школе планетоведения, обусловило высокую степень доверия к этим результатам со стороны астрономического сообщества. Во второй половине XX века с увеличением диаметров используемых телескопов на первое место среди таких факторов выдвинулось замыкающее влияние турбулентной земной атмосферы. Это вызвало к жизни развитие в нашей обсерватории нового научного направления по изучению проблемы видения сквозь турбулентную среду и повышения углового разрешения наземных телескопов (см. статью В. Н. Дудинова и др.). Увеличение объема и повышение качества наблюдательного материала (особенно данных о Марсе) стимулировало работы по изучению рассеяния света несферическими частицами и другим задачам оптики планетных атмосфер (Е. С. Зубко, Д. В. Петров, В. П. Тишковец, Ю. Г. Шкуратов).

В целом, исследования по планетной проблематике в Харьковском университете были сосредоточены на изучении фотометрических и поляриметрических характеристик планет и определении на этой основе их физических и других свойств. Не изучались, например, такие характеристики планет, как их гравитационные и магнитные поля, внутреннее строение планет. Стремление охватить в более или менее сбалансированном виде все многообразные аспекты планетоведения, все богатство физических свойств планет привело к созданию учебного пособия Ю. В. Александрова «Введение в физику планет» (1982 г.). В 1997 г. вышло второе дополненное его издание на украинском языке «Фізика планет». В 2000 г. было опубликовано учебное пособие Н. Н. Евсюкова и Ю. В. Александрова «Хімія і геологія планет».

До Великой Отечественной войны планетные исследования развивались в основном лишь в Ленинграде и Харькове. Послевоенное время и приближение эпохи освоения космоса потребовали более широкого развертывания этих исследований в нашей стране. С этой целью и по инициативе Н. П. Барабашова была создана Комиссия по физике планет Астрономического совета АН СССР. В 1949 г. в Харькове состоялся ее первый (организационный) пленум. Н. П. Барабашов был избран председателем комиссии и возглавлял ее в течение 17 лет. Комиссия издавала свои «Известия», где публиковались результаты планетных исследований. В 1950-х – первой половине 1960-х годов в Харькове регулярно раз в два года проводились пленумы этой комиссии. Дискуссии, подчас весьма острые, между мэтрами планетной астрономии тех лет Н. П. Барабашовым, В. В. Шароновым, А. В. Марковым, А. В. Хабаковым и другими сыграли большую роль в воспитании тогдашних студентов и аспирантов нашей кафедры астрономии (ныне уже образующих старшее поколение харьковских астрономов).

Подводя итоги планетных исследований в Харьковском университете, нужно вспомнить и имена людей – инженеров и лаборантов, обеспечивавших техническую, вычислительную сторону этих работ как в домашнее время, так и в эпоху ЭВМ. Это Е. М. Бороденко, Л. И. Ефимова, Л. Ф. Капанина, М. И. Капинус, В. И. Лацько, Н. Г. Литкевич, Т. А. Лупишко, В. А. Макаренко, В. П. Ярko. Нужно вспомнить и имена механиков обсерватории разных лет – А. С. Салыгина, Л. И. Касселя, Л. В. Павленко, В. Л. Павленко.

В 1948 г. была создана в Киеве Главная астрономическая обсерватория АН Украины. В начале 1960-х годов стало необходимым развернуть и в ней исследования планет. Возглавил отдел физики планет ГАО АН Украины И. К. Коваль – ученик Н. П. Барабашова. Позже в Киеве в этом отделе в разные годы начали работать выпускники кафедры астрономии ХГУ – Л. А. и О. И. Бугаенко, Э. Г. Яновицкий, В. Г. Парусимов, В. В. Кругов, В. А. Кучеров, А. Н. Довгопол. Профессор Э. Г. Яновицкий широко известен своими исследованиями по проблеме переноса излучения в неоднородных планетных атмосферах. Многолетний опыт украинской планетной школы, основание которой было положено в Харьковском университете, обобщен в фундаментальной монографии профессора А. В. Мороженко «Методи та результати вивчення фізичних характеристик хмарових шарів в планетних атмосферах».

Ученики Н. П. Барабашова и ученики его учеников работали и работают в различных

центрах планетных исследований в СССР, а теперь СНГ. В Астрофизическом институте АН Казахстана – С. М. Гайсин, К. С. Куратов, Л. П. Жмуркова, Е. Я. Гидалевич, в Астрономическом институте АН Узбекистана – В. С. Шевченко, в Шемахинской астрофизической обсерватории – Н. Б. Ибрагимов, Л. А. Голубева, Д. И. Шестопалов.

Таким образом, есть все основания утверждать, что планетные исследования в Харьковском университете – это весьма весомый вклад в развитие физики планет в Советском Союзе и в Украине.

2.4. ПОЛЯРИМЕТРИЯ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЮПИТЕРА

к.ф.-м.н. В. В. Корохин и О. С. Шалыгина

Введение

Аномальное поведение поляризации отраженного излучения в полярных областях Юпитера было обнаружено еще в 20-х годах прошлого века Лио [1]. В отличие от низкоширотных областей степень линейной поляризации на широтах более 35° начинает резко возрастать к полюсам, достигая значений $P = 6-7\%$ (см. рис. 2.4.1). Такое поведение поляризации не обнаруживает зависимости от угла фазы. При этом плоскость поляризации ориентирована вдоль радиуса планеты. В дальнейшем эти эффекты были подтверждены и исследованы Дольфюсом [2,3], который также обнаружил асимметрию поляризации север-юг и ее изменения во времени. Последующие наблюдения Холла и Рили [4-6], Кемпа и др. [7], Болквадзе [8] и других исследователей полностью подтвердили этот эффект.

Многочисленные данные наблюдений (в том числе и прямых наблюдений прохождений спутников по диску Юпитера) и модельных расчетов свидетельствуют о том, что в стратосфере Юпитера находится слой аэрозольной дымки со значительно большей ее концентрацией в высокоширотных областях (широты выше $40^\circ-50^\circ$) по сравнению с низкоширотными. Оценки высот, на которых может находиться этот слой, указывают на атмосферные слои с давлением, равным единицам и десяткам миллибар для полярных регионов и десяткам-сотням миллибар для экваториальных областей [9-16]. Именно при рассеянии света в этом аэрозольном слое может возникать наблюдаемая поляризация. Естественно, что любые изменения физических условий в верхних слоях Юпитера будут приводить к изменениям рассеивающих свойств этого слоя (например, через изменения концентрации частиц и/или их размера), что будет приводить к вариациям поляризации, а это значит, что поляриметрия может быть весьма эффективным методом для изучения верхних слоев атмосферы Юпитера. В 1981 г. в Харьковской обсерватории по инициативе В. Г. Тейфеля (Астрофизический институт АН Казахстана) О. М. Стародубцевой и Л. А. Акимовым были начаты поляриметрические наблюдения Юпитера. В настоящее время эта работа продолжается В. В. Корохиным, Ю. И. Великодским, О. Шалыгиной (Горюновой) и Е. Шалыгиным. Об основных результатах этой работы и пойдет речь в данном разделе.

Поляриметрические наблюдения Юпитера

Первые наблюдения были проведены О. М. Стародубцевой фотографическим методом в 4-х участках спектра ($\lambda_{\text{эфф}} = 0,630; 0,530; 0,435; 0,365$ мкм) в 1981 г. в течение 22 ночей с марта по июнь на 70-см телескопе АЗТ-8, установленном на Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ (Стародубцева и Тейфель, 1984). В качестве анализатора использовался двоякопреломляющий кристалл исландского шпата, установленный перед фотопластинкой, что обеспечивало одновременное получение изображений в обычных и необыкновенных лучах со взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации. Наблюдения планеты были проведены в диапазоне фазовых углов от $-1,9^\circ$ до $+10,3^\circ$, т.е. практически во всем, доступном с Земли.

В 1985 и 1986 г.г. наблюдения проводились О.М. Стародубцевой (совместно с В. Г. Тейфелем) на высокогорной обсерватории АФИФ АН Казахстана на 1-м телескопе «Карл Цейсс Йена», оборудованном спектрографом низкой дисперсии АСП-9. Так же как и в 1981 г., использовался кристалл исландского шпата. В течение трех ночей в каждый из годов было получено несколько сотен распределений вдоль центрального меридиана относительной интенсивности и степени поляризации во всем интервале долгот. Для 1985 г. спектрограммы измерены в длинах волн 0,42; 0,46; 0,60 мкм. Для 1986 г. – в 0,46 и 0,60 мкм.

В период с 1989 г. по 1997 г. для наблюдений использовался поляриметр, разработанный и созданный Корохиным В. В. на основе линейного ПЗС-фотоприемника, с поляроидом ПФ-40,5 в качестве анализатора (Корохин и др., 1993). Он обеспечивал регистрацию данных в цифровом виде и полностью управлялся с помощью персонального компьютера. Эффективная длина волны спектральной чувствительности системы составляла 472 нм. Во время наблюдений ПЗС-линейка ориентировалась вдоль центрального меридиана планеты. По наблюдениям в каждый из периодов в интервале 1989 – 1997 г.г. было получено несколько сот распределений относительной интенсивности, степени и угла поляризации вдоль центрального меридиана при различных его долготах, полностью охватывающих (большой частью неоднократно) всю планету.

Необходимо отметить, что наблюдения, проведенные в 1989 г. в хороших астро-климатических условиях на высокогорной обсерватории АФИ АН Казахстана при положительном склонении Юпитера, позволили провести подробное исследование долготных вариаций поляризации (Стародубцева и др., 1994). Остальные же данные 1993 – 1997 г.г. получены на Чугуевской наблюдательной станции нашего НИИ в условиях равнинной обсерватории, которая похвастаться высоким качеством астроклимата, к сожалению, не может. Тем не менее, эти данные (вместе с более ранними наблюдениями 1981 – 1986 г.г.) после усреднения для каждого периода наблюдений стали основой для изучения долговременных (сезонных) изменений в поляризации полярных областей Юпитера.

Начиная с 1998 г., наблюдения проводятся с помощью нового фотополяриметра «х_CCD», оснащенного ПЗС-матрицей (Корохин и др., 2000). Применение панорамного фотоприемника позволило вывести наблюдения на новый качественный уровень – теперь регистрировался весь диск Юпитера, а не только центральный меридиан, что позволило свести к минимуму ошибки, вызванные некачественным гидированием, и использовать для анализа информацию, полученную от всего диска планеты. Во время наблюдений с новым прибором применяется старт-стопный режим вращения анализатора поляризации (поляроид ПФ-40,5): кадр, поворот поляроида на 45° , снова кадр, снова поворот поляроида на 45° и т.д. За один оборот поляроида за время порядка 10 сек регистрируется 8 кадров. Количество полных оборотов анализатора на одну серию наблюдений выбирается, как правило, 50, то есть регистрируется 400 кадров. Подробнее методика наблюдений и обработки данных описана в работе Шалыгина и др. (2007). С 1998 по 2005 год наблюдения с этим прибором проводились на Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ на 70-см телескопе АЗТ-8 и в Харькове на 20-см рефракторе Цейсса. Первые же наблюдения с новым прибором в сентябре 1998 г. оказались весьма удачными. В течение всего 17-дневного периода наблюдений на Чугуевской наблюдательной станции была ясная погода, что позволило получить несколько сотен распределений интенсивности и степени поляризации по диску Юпитера в разных фильтрах для всех долгот центрального меридиана за несколько оборотов планеты. Это дало возможность более детально изучить долготные вариации степени линейной поляризации и показать их возможную связь с магнитным полем Юпитера (Starodubtseva et al., 2002). 9 и 10 сентября 1998 г. качество изображения было не хуже 0,8 – 1,0 сек. дуги. Изображения такого высокого разрешения позволяют исследовать тонкие эффекты в распределении поляризации по диску Юпитера и могут служить хорошей основой для изучения рассеивающих свойств облачного слоя планеты (Shalygin et al., 2004).

В августе-сентябре 2006 г. Ю. И. Великодским и Н. В. Опанасенко были проведены поляриметрические наблюдения Юпитера на горе Майданак (Узбекистан) с поляриметром, оптико-механическая часть которого аналогична прибору «х_CCD», а в качестве фотоприемника использовалась цифровая CMOS-камера «Canon 350D». Данные этих наблюдений еще не обработаны, но традиционно высокое качество изображений, получаемых на горе Майданак, позволяет надеяться, что они позволят изучать тонкие эффекты в распределении поляризации по диску Юпитера.

Без лишней скромности можно констатировать, что 25-летний цикл поляриметрических наблюдений Юпитера, полученный усилиями двух поколений харьковских астрономов и охвативший 2 оборота этой планеты вокруг Солнца, является самым полным и продолжительным в мире. Анализ этих данных позволил получить новые, интересные сведения о верхних слоях юпитерианской атмосферы, которые кратко представлены ниже.

Долготные вариации поляризации в приполярных районах Юпитера и их связь с магнитным полем

Изучение поведения степени линейной поляризации в приполярных областях (на широтах $55^\circ - 75^\circ$) выявило следующую особенность (Стародубцева и др., 1994). При сравнении друг с другом данных разных лет долготные вариации степени поляризации не обнаруживают какой-либо регулярности, если наблюдения представлены в I и II системах долгот. В III же системе долгот (связанной с вращением магнитосферы Юпитера) выявляется систематический сдвиг фазы модуляции степени поляризации в сторону уменьшения долгот, равный примерно 50° в год. Существует ряд явлений, связанных с магнитосферой Юпитера, которые либо беспорядочны, либо дрейфуют в III системе [17]. В связи с этим авторы [17] предложили гипотезу о двойной периодичности магнитосферы Юпитера и ввели IV систему долгот, связанную со значением периода, большим значения периода в III системе на 3%. Наши данные, представленные в IV системе долгот, показывают стабильность фазы модуляции кривой зависимости поляризации от долготы в этой системе от года к году (рис. 2.4.2). Это, с одной стороны, является дополнительным свидетельством реальности существования IV системы и, с другой стороны, позволяет высказать предположение о влиянии магнитосферы планеты на образование стратосферных частиц в полярных областях.

Еще одним доказательством возможной связи между напряженностью поверхностного поля и содержанием дымки может служить наш результат, полученный из наблюдений 1998 г. (Starodubtseva et al., 2002). На рис. 2.4.3 сравнивается долготное распределение степени поляризации, полученное нами, с вариациями напряженности магнитного поля [18]. Видна довольно хорошая обратная корреляция между вариациями поляризации и мощностью поля. Мы рассматриваем полученный результат не как твердо установленный факт, а как основание для дальнейших исследований такого рода, ибо, если предположение о влиянии магнитосферы на аэрозольную дымку является верным, это имеет значение для дальнейшего развития работ по исследованию физических условий в атмосфере Юпитера.

Сезонные вариации северо-южной асимметрии поляризации и их причины

Как известно, северо-южная асимметрия Юпитера проявляется практически во всем. Она хорошо заметна на многочисленных изображениях этой планеты, полученных как наземными, так и космическими средствами: взять хотя бы различие в структуре зон и полос для полушарий. Поляризация не является исключением. И хотя впервые на факт северо-южной асимметрии поляризации указывал еще Дольфус [2,3], наиболее полное исследование этого явления было проведено в НИИ астрономии ХНУ.

Для описания северо-южной асимметрии поляризации удобно использовать параметр $P_N - P_S$, равный разности модулей значений степени линейной поляризации P для севера и юга на широтах $\pm 60^\circ$ вдоль центрального меридиана. Было показано (Starodubtseva et al., 2002), что значения параметра $P_N - P_S$ довольно хорошо организованы, если их изобразить в зависимости от планетоцентрической орбитальной долготы Солнца. Поэтому была выдвинута гипотеза о влиянии сезонных изменений инсоляции на вариации поляризации.

После выхода работы (Starodubtseva et al., 2002) исследования были продолжены с участием уже нового поколения харьковских астрономов (Шалыгины Оксана и Евгений, Великодский Ю. И.) Была проведена переобработка данных старых наблюдений с использованием улучшенного алгоритма первичной обработки и расчета асимметрии поляризации. Кроме того, к анализу были привлечены данные, полученные Холлом и Рили в ультрафиолетовой области спектра ($\lambda = 370$ нм) в 1968 и 1972 – 1974 г.г. [4-6], что позволило значительно расширить ряд данных для исследования сезонных вариаций поляризации.

Новый график изменений северо-южной асимметрии поляризации в зависимости от положения Юпитера на орбите (L_S) представлен на рис. 2.4.4 (верхний график). Из рисунка видно, что существует некоторая явно периодическая зависимость параметра $P_N - P_S$ от L_S . Для выяснения характера этой зависимости была проведена ее аппроксимация различными функциями. Ранее, в работе (Starodubtseva et al., 2002), использовалась синусоидальная функция с периодом 180° , которую трудно интерпретировать физически. По новым данным аппроксимацию такой функцией провести не удалось. В то же время периодические функции с периодом 360° хорошо описывают зависимость: синусоидальная функция (рис. 2.4.4 и 2.4.5, кривая 1) дает значимое уменьшение дисперсии по сравнению с аппроксимацией

константой с доверительной вероятностью 0,76 по F-критерию; пилообразная функция ($P_N - P_S$ (%) = $1,83 - 0,005L_S$ для $160^\circ < L_S < 520^\circ$, с периодическим продолжением с периодом 360°) имеет доверительную вероятность 0,96. Для проверки устойчивости решения был проведен следующий эксперимент. Аппроксимационная функция находилась только по части данных (1989 – 2004 г.г.) (рис. 2.4.5, кривая 2). Если продлить найденную зависимость, то видно, что наши более ранние данные и данные Холла и Рили хорошо согласуются с предлагаемой аппроксимацией. Таким образом, можно утверждать, что существуют *периодические вариации* поляризации.

В нижней части рис. 2.4.4. приведена теоретически рассчитанная асимметрия инсоляции для полярных регионов $\frac{I_N}{I_S}$ (отношение величин инсоляции на севере и юге на широтах $\pm 60^\circ$). Коэффициент корреляции между параметрами асимметрии поляризации $P_N - P_S$ и инсоляции $\frac{I_N}{I_S}$ составляет -0,7, что говорит о значимой антикорреляции. Таким образом, высказанное ранее предположение о существовании связи между колебаниями поляризации и инсоляции (Starodubtseva et al., 2002) подтвердилось новыми данными, и можно говорить о существовании *сезонных вариаций* поляризации.

Каким же образом сезонные изменения инсоляции могут приводить к вариациям поляризации? Как известно, в отличие от Земли, Юпитер имеет маленький угол наклона оси вращения ($\sim 3^\circ$), но больший эксцентриситет орбиты ($\sim 0,05$). Это вызывает 20%-ные вариации в величине потока солнечного излучения. Кроме того, перигелий и максимум склонения Солнца почти совпадают по времени для северного полушария. Это приводит, во-первых, к ощутимым сезонным вариациям в инсоляции и температуре ($\pm 25^\circ\text{K}$), а во-вторых, к их северо-южной асимметрии [19-21].

Как уже было отмечено в начале главы, фактором, чувствительным к изменениям температуры в атмосфере Юпитера, может быть полярная стратосферная аэрозольная дымка. Вероятно, аэрозоль в дымке находится в нестабильном состоянии, и даже небольшое изменение физических условий может приводить к более интенсивному образованию или распаду частиц. Антикорреляция асимметрии поляризации и инсоляции может быть объяснена следующим образом. Летом аэрозольный слой в стратосфере Юпитера может существенно нагреваться солнечным излучением. При этом уменьшается пересыщение пара вещества дымки, и его конденсация будет замедляться. В результате концентрация частиц в слое дымки будет значительно уменьшаться, что уменьшит рассеяние света на частицах дымки и, следовательно, значение поляризации. При понижении температуры будет наблюдаться обратный процесс – увеличение концентрации и степени линейной поляризации. Таким образом, сезонные изменения температуры могут приводить к сезонным вариациям поляризации света, отраженного Юпитером, в его полярных областях.

Исследование физических свойств стратосферного аэрозольного слоя Юпитера

В 2005 году мы перешли от исключительно «феноменологических» исследований поведения поляризации света аэрозольным слоем Юпитера (распределения поляризации по диску, долготной и сезонной зависимостей) к рассмотрению физико-химических процессов в нем. И хотя эта работа сейчас находится только в самом начале, тем не менее, уже получены первые результаты, касающиеся свойств частиц аэрозольной дымки (Шалыгина и др., 2007).

За последнее время вышло много работ, в которых в качестве вещества полярной аэрозольной дымки принимаются бензол и полиароматические углеводороды (ПАУ), такие как нафталин, фенантрен, пирен. Бензол был впервые обнаружен на Юпитере в 1985 г. [22] с помощью инструмента IRIS (Voyager Infrared Interferometer Spectrometer) в северном полушарии вблизи широты 60° , который также указал на присутствие бензола на всех широтах. А данные комплексного инфракрасного спектрометра на борту космического аппарата «Кассини» подтвердили его присутствие на северных и южных высоких широтах [23].

На базе предложенной в работах [24, 25] микрофизической и химической модели образования бензола и полиароматических углеводородов в атмосфере Юпитера мы провели исследование условий образования полярной аэрозольной дымки. Средняя температура в стратосфере Юпитера имеет величину порядка 150 K [26]. Поскольку эта температура ниже тройных точек для нафталина (359 K) и бензола (278 K), они должны образовывать

кристаллические зародыши непосредственно из газовой фазы. Причем, как показали наши расчеты (Шалыгина и др., 2007), имеет место гомогенное образование частиц, то есть процесс зарождения, который протекает без дополнительных центров конденсации. А это означает, что в стратосфере Юпитера есть все условия для образования достаточно плотного аэрозольного слоя, состоящего из полиароматических веществ.

Для исследования влияния изменения температуры на образование ПАУ в стратосфере Юпитера мы рассчитали высотные профили пересыщений ПАУ. При этом были использованы высотные профили концентраций ПАУ из работы [25]. В первом приближении можно предположить, что с изменением температуры зависимость атмосферного давления от высоты и, следовательно, высотный профиль давления паров ПАУ остаются прежними, а меняется только давление насыщения. На рис. 2.4.6 показаны высотные профили пересыщений для температур 120, 150 и 180 °K, которые выбраны из следующих соображений: средняя температура на уровне дымки равна 150 K [26], а ее сезонные изменения на севере и юге составляют около ± 30 °K. Как видно из рисунка, в условиях стратосферы Юпитера бензол не конденсируется при температурах $T > 120$ K (пересыщение отрицательно при всех рассмотренных температурах), а вероятность гомогенного зарождения фенантрена и последующего образования нафталина при температурах 120 и 150 K очень велика. При температуре 180 °K не конденсируются никакие из рассмотренных нами ПАУ. То есть наше предположение, что изменения температуры оказывают значительное влияние на процесс гомогенного зародышеобразования в стратосфере Юпитера, хорошо подтверждается.

Кроме рассмотренных выше сезонных колебаний температуры, на физико-химические процессы в стратосфере Юпитера может оказывать влияние солнечная активность. Поэтому был проведен поиск возможных связей между параметрами, характеризующими солнечную активность, и наблюдаемой асимметрией поляризации (Шалыгина и др., 2007). К сожалению, он не позволил дать уверенный ответ на вопрос: какие из факторов (солнечный ветер, рентгеновские лучи) оказывают непосредственное влияние на аэрозольный слой Юпитера. Это связано с недостаточным количеством данных как о солнечной активности, так и об асимметрии поляризации. Тем не менее, можно ставить вопрос о возможном влиянии высокоэнергичных протонов (солнечных космических лучей) на процессы образования аэрозолей в полярных областях. Это соображение подкрепляется тем, что, как показывают наши расчеты, в стратосферу Юпитера до интересующих нас высот проникает достаточно большое количество энергичных частиц, которые могут участвовать в серии химических реакций, в результате которых образуется «строительный материал» для дальнейшего формирования стратосферного аэрозоля. Образование же зародышей частиц на этих ионах не происходит (Шалыгина и др., 2007).

Моделирование рассеяния света полярной аэрозольной дымкой

Чтобы провести разумную интерпретацию поляриметрических наблюдений Юпитера и увязать их с результатами теоретического моделирования физико-химических процессов в аэрозольном слое, необходимо иметь адекватную модель рассеяния света в нем.

К настоящему времени известны несколько моделей поляризации света атмосферой Юпитера. Это, прежде всего, модели Мороженко и Яновицкого [27], Мищенко и Длугач [28] и Smith and Tomasko [12]. Однако все они разрабатывались и применялись преимущественно для интерпретации наблюдений центральных областей диска Юпитера. Объяснения поведения степени линейной поляризации в полярных регионах и, в частности, механизма возникновения поляризации при нулевых орбитальных углах фазы они не дают. Поэтому нами была предпринята попытка разработать такую модель, чтобы применить ее для интерпретации наших наблюдений (Goryunova et al., 2005).

В рамках этой модели мы полагаем, что в полярных областях основной вклад в поляризацию дает излучение, отраженное подстилающей поверхностью и затем рассеянное на частицах аэрозольной дымки, находящейся на высоте h (рис. 2.4.7). Регистрируемое наблюдателем излучение I состоит из трех компонент: $I = I_c + I_{c-h} + I_h$, где I_c – интенсивность излучения, отраженного подстилающей поверхностью облаков; I_{c-h} – интенсивность отраженного подстилающей поверхностью излучения, рассеянного на аэрозолях; I_h – интенсивность излучения Солнца, непосредственно рассеянного аэрозольной дымкой.

По оценочным данным различных работ (например, [25, 29]) концентрация частиц размером $r \sim 0,5$ мкм на уровне давлений 20 миллибар, на котором может находиться

аэрозольный слой, относительно невелика ($0,5 - 1,0 \text{ см}^{-3}$), поэтому можно предположить, что большая часть излучения от подстилающей поверхности, скорее всего, пройдет беспрепятственно и внесет основной вклад в суммарную интенсивность. Если считать, что свет от подстилающей поверхности неполяризован, то вклад компоненты I_c в поляризацию необходимо учитывать в виде деполяризации. Факт такой малой концентрации частиц также позволяет нам предположить, что основной вклад в поляризацию будет вносить однократное рассеяние. Что касается составляющей I_h , то она при углах фазы, близких к нулю, дает несущественный вклад в поляризацию.

Таким образом, механизм возникновения поляризации в полярных областях Юпитера заключается в рассеянии излучения, отраженного подстилающей поверхностью, на аэрозольной дымке. Очевидно, что в участок дымки излучение приходит с поверхности, ограниченной линией горизонта (конус на рис. 2.4.7). Поэтому характерные углы рассеяния на аэрозольной дымке будут существенно отличаться от нуля.

Предложенная модель была реализована в аналитически-компьютерном виде и, при своей явной упрощенности, показала неплохое качественное согласие с наблюдениями (рис. 2.4.8). В нашей работе (Goryunova et al., 2005) приведены результаты подробного исследования модели: зависимость от высоты дымки, длины волны, размера частиц, функции распределения по размерам, коэффициента преломления вещества и прочее. Эти результаты показали вполне разумное поведение. Более того, по смене знака поляризации, которое наблюдается для полярных регионов Юпитера при изменении длины волны [7], нами был оценен характерный размер аэрозольных частиц, который составил $0,5 \text{ мкм}$, что не противоречит данным других исследователей.

Дальнейший прогресс исследований невозможен без разработки количественной модели рассеяния света атмосферой Юпитера, которая позволит максимальным образом учесть все факторы, которые могут влиять на наблюдаемое поведение поляризации. Одним из возможных подходов к решению этой задачи могут быть численные расчеты рассеяния света методом Монте-Карло. Разработка такого алгоритма, позволяющего моделировать рассеяние в многокомпонентной среде, состоящей из произвольных частиц и имеющей произвольную пространственную конфигурацию, ведется в нашем отделе (основной разработчик Е. В. Шалыгин). Сейчас идет процесс интенсивного тестирования алгоритма, и в ближайшее время мы собираемся на его основе начать разработку новой модели рассеяния света аэрозольной стратосферной дымкой и облачным слоем Юпитера.

Перспективы исследований

Конечно же, мы планируем продолжить наш 25-летний ряд поляриметрических наблюдений Юпитера. Однако основной акцент в ближайшее время будет сделан на изучение физико-химических процессов в аэрозольном слое и моделирование рассеяния света, как этим слоем, так и облаками Юпитера. В частности, планируется построение высотного профиля стратосферного аэрозольного слоя (размеров частиц и их концентрации), изучение влияния магнитного поля планеты, космических и метеорологических факторов на процессы формирования этого слоя. Также мы планируем проводить исследования тонких эффектов в распределении поляризации по диску Юпитера и закона отражения света облачным слоем на базе изображений с высоким разрешением, полученных нами в 1998 и 2006 годах, и данных космических аппаратов, к которым мы имеем доступ.

Литература

1. *Lyot B.* Recherches sur le polarization de la lumiere des planets et de quelques substances terrestres // Ann. Obs. Paris (Meudon). – 1929. VIII, (In English, NASA TT F-187).
2. *Dollfus A.* Etude des planets par la polarization de leur lumiere. – Theses. Ser. A, 1955, No 2869, Paris.
3. *Дольфус А.* Исследования поляризации планет // Планеты и спутники. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 3-6-352.
4. *Hall J. S., Riley L. A.* Photoelectric observations of Mars and Jupiter with a scanning polarimeter // Lowell Obs. Bull. – 1968. – V.7. No.145. – P. 83-92.

5. *Hall J. S. and Riley L. A.* Polarization measurements of Jupiter and the Great Red Spot // *Planets, Stars and Nebulae Studied with Polarimetry* / Ed. Gehrels T. Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 1974. – P.593-598.
6. *Hall J. S., Riley L. A.* A polarimetric search for fine structure on Jupiter's disk // *Icarus*. – 1976. – V. 29. – P.231-234.
7. *Kemp K. G., Rudy R. J., Lebofsky M. J. et al.* Near infrared polarization studies of Saturn and Jupiter // *Icarus*. – 1978. – V.35.№2. – P. 263-271.
8. *Болквадзе О. Р.* Исследование поляризационных свойств Юпитера // *Бюл. Абст. АО*, 1980, № 53. – С. 131-162.
9. *Kim S.J., Drossart P., Caldwell J., Maillard J.P., Goorvitch D., Moorwood A., Moneti A., Lecacheux J.* The 2- μ m polar haze of Jupiter // *Icarus*. – 1991. – V. 91. – P.145-153.
10. *Mallama A., Krobusek B.F., Collins D.A., Nelson P., Park J.* The radius of Jupiter and its polar haze// *Icarus*. – 2000. – V.144. – P. 99-103.
11. *Hord C. W., West R. A., Simmons K. E., Coffeen D. L., Sato M., Lane A. L., Bergstralh J. T.* Photometric observations of Jupiter at 2400 angstroms // *Science*. – 1979. – V. 206. – P.956-959.
12. *Smith P. H., Tomasko M. G.* Photometry and polarimetry of Jupiter at large phase angles. II. Polarimetry of the South tropical zone, South equatorial belt, and the polar regions from the Pioneer 10 and 11 missions // *Icarus*. – 1984. – V. 58. – P. 35-73.
13. *Тейфель В.Г.* Полярные области Юпитера и Сатурна // *Астрон. вестн.* – 1985. – Т.19. N.1. – С. 48-63.
14. *West R. A.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. I. Absolute reflectivity and center-to-limb variations in the 6190-, 7250-, and 8900-A bands // *Icarus*. – 1979. – V.38. – P. 12-33.
15. *West R. A.* Voyager 2 imaging eclipse observations of the Jovian high altitude haze // *Icarus*. – 1988. – V.75. – P.381-398.
16. *West R. A., Tomasko M. G.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. III. Cloud vertical structures for several axisymmetric bands and the Great Red Spot // *Icarus*. – 1980. – V.41. –P.278-292.
17. *Sandel B. R., Dessler A. J.* Dual periodicity of the Jovian Magnetosphere // *J.Geophys.Res.* – 1988. – V.93,N A6. – P. 5487-5504.
18. *Connerney, J.E.P.* Magnetic fields of the outer planets. *J. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98, No E10. – P.18,659-18,679.
19. *Beebe R. F., Suggs R. M., Little T.* Seasonal north-south asymmetry in solar radiation incident on Jupiter's atmosphere // *Icarus*. – 1986. – V. 66. – P. 359-365.
20. *Beebe R. F., Orton G. S., West R. A.* Time-variable nature of the Jovian cloud properties and thermal structure: an observational perspective // *Time-Variable Phenomena in the Jovian System* / Ed. Belton M.J.S., West R.A., Rahe J. National Aeronautics and Space Administration Office of Management. Scientific and Technical Information Division, Washington, DC. – 1989. – P. 245-288.
21. *Caldwell J., Cess R. D., Carlson B. E.* Temporal Characteristics of the Jovian atmosphere // *Astrophys. J.* – 1979. – V. 234. – P.L155-L158.
22. *Kim S. J., Caldwell J., Rivolo A.R., Wagener R., and Orton G. S.* Infrared polar brightening on Jupiter // *Icarus*. – 1985. – V. 64. – P. 233-248.
23. *Flasar F. M.* CIRS observations of Jupiter // *COSPAR abstract*, 2002.
24. *Wong Ah-San, Anthony Y. T., Yung Yuk L.* Jupiter: Aerosol chemistry in the polar atmosphere // *Astrophys. J.* – 2000. – V.534. – P. L215-L217.
25. *Friedson A. James, Wong Ah-San, Yung Yuk L.* Models for Polar Haze Formation in Jupiter's Stratosphere // *Icarus*. – 2002. – V.158, Issue 2. – P. 389-400.
26. *Trafton L. M. et al.* High-resolution spectra of Jupiter's northern auroral ultraviolet emission with the Hubble Space Telescope // *Astrophys. J.* – 1994. – V.421. – P.816-827.
27. *Morozhenko, A. V., Yanovitskii E. G.* The optical properties of Venus and the jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // *Icarus*. – 1973. – 18. – P. 583-592.
28. *Dlugach J. M. and Mishchenko M. I.* The effect of particle shape on physical properties of the Jovian aerosols obtained according earth-based spectropolarimetric observations // *Abstracts of NATO ASI*, 2003.
29. *Rages K., Beebe R., Senske D.* Jovian stratospheric hazes: The high phase angle view from Galileo // *Icarus*. – 1999. – V.139. – P. 211-226.

2.5. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ К МАРСУ И ВЕНЕРЕ

к.ф.-м.н. М. А. Креславский и д.ф.-м.н. Ю. Г. Шкуратов

Предварительные замечания

С началом космической эры в 60-х годах прошлого века исследование Солнечной системы перестало быть прерогативой только астрономии. Полеты космических аппаратов (КА) за пределы Земли и околоземного пространства привели к грандиозному расширению методов исследования объектов Солнечной системы и вовлекли в исследования огромное количество специалистов из смежных и не смежных с астрономией областей знаний: инженеров, геологов, геофизиков, метеорологов. Постепенно некоторые традиционные виды астрономических наблюдений полностью потеряли научную ценность. Работы по планетной астрономии стали исчезать из традиционных астрофизических журналов, в то же время результаты астрономических исследований планет стали публиковаться в журналах по геофизике; с другой стороны, журналы, специализировавшиеся на планетной астрономии («Icarus», «Астрономический вестник») стали охотно публиковать, например, работы чисто геологического содержания; стали возникать новые научные журналы. Происходит и в настоящее время подходит к завершению медленный процесс становления новых областей научных знаний – науки о планетных и малых телах, планетологии (planetary science) и науки о межпланетной среде (space science). Для некоторых астрономов Солнечная система как предмет изучения стала чем-то «недостойным»; другие, в том числе большая часть харьковских ученых, напротив, целиком окунулись в новую растущую область знаний. На протяжении последней четверти века истории Харьковской астрономической обсерватории обработка данных космических миссий к телам Солнечной системы была и остается одним из важнейших направлений деятельности.

Потребителями астрофизической информации о планетах, получаемой в результате обработки и анализа данных, являются специалисты смежных специальностей: геологи, геохимии, геофизики. Поэтому значительное количество работ по анализу данных выполнялось в сотрудничестве и публиковалось в соавторстве с коллегами этих специальностей. Особую роль для нас играли и продолжают играть научные контакты с Лабораторией сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского в Москве и с отделением геологии планет факультета наук о Земле Университета Брауна в г. Провиденс, штат Род Айленд, США. Харьковчане стали постоянными участниками и неотъемлемой частью традиционного международного Микросимпозиума по планетологии, который более двух десятилетий регулярно проводится этими двумя организациями.

Эта глава посвящена нашим работам по анализу космических данных о Венере и Марсе. Первыми работами в Харьковской обсерватории, посвященными обработке и анализу планетных космических данных, полученных КА «Марс-4» и «Марс-5», были работы Дудинова и др. (1980) и Езерского и др. (1980). В первой работе была выполнена обработка панорам Марса, полученных с помощью оптико-механических сканеров, на когерентно оптической установке нашей обсерватории. В частности, с помощью режекторного фильтра, установленного в частотной плоскости, была отфильтрована строчная (телевизионная) структура изображений марсианской поверхности. В работе (Езерский и др., 1980) была предпринята одна из первых попыток проведения фотометрического анализа поверхности Марса по данным космической съемки; в частности, была подтверждена тесная корреляция между показателем цвета и альбедо поверхности, известная по данным телескопических измерений. В основном, обработку и калибровку данных КА «Марс-5» проводил В. И. Мамницкий совместно с разработчиками бортового телефотометра.

Работы по анализу результатов радиолокационного зондирования поверхности Венеры, полученных в ходе полета американского КА «Пионер-Венера-1», были выполнены совместно с сотрудниками ИРЭ АН УССР и ГЕОХИ им. В. И. Вернадского АН СССР (Корниенко и др., 1982, Усиков и др., 1982, Шкуратов и др., 1984, Basilevsky et al., 1982). Эти работы, сделанные в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века, были пионерскими,

впервые использовали компьютеры для обработки и анализа изображений. Они заложили методические основы опыта, которым мы пользуемся до сих пор. В этих работах, в частности, впервые реконструировано изображение рельефа поверхности Венеры по распределению высот, полученному с помощью радиолокатора КА «Пионер-Венера-1». Пример таких изображений для района гор Максвелла показан на рис. 2.5.1. Аналогичное изображение (а также стереопара изображений) приведено на рис. 2.5.2 для района огромного щитового вулкана Бета (цифры указывают места посадки КА «Венера-9» – «Венера-14»). Кроме того, были исследованы корреляции между распределением высот и степенью шероховатости поверхности в дм-диапазоне неровностей и проведен кластерный анализ корреляционных диаграмм. Для анализа использовалось также распределение наклонов поверхности на базе сотни километров. Пример такого распределения для района Земли Иштар показан на рис. 2.5.3 в виде штриховой карты.

После полета АМС «Венера-15» и «Венера-16» и получения радиолокационных изображений части поверхности Венеры стало возможным геологическое картирование этой планеты. Сравнивая геологические карты с глобальными радиофизическими данными КА «Пионер-Венера», мы выполнили прогнозирование распространенности геологических подразделений на части планеты, не покрытые радарными изображениями. Это, в частности, касалось структур, получивших название «тессера» (Bindschadler et al., 1990). Затем, после полета КА «Магеллан», этот прогноз блестяще подтвердился. С середины 90-х годов, после завершения работы КА «Магеллан», результаты этой миссии к Венере надолго стали материалом наших работ.

Важная серия ранних (середина 80-х) работ была связана с количественным анализом панорам поверхности Венеры, переданных советскими автоматическими межпланетными станциями (АМС) серии Венера (Шкуратов и др., 1987).

Мы участвовали в анализе изображений спутника Марса, Фобоса, полученных в ходе полета советской АМС «Фобос-2» (Жуков и др., 1994, Аванесов и др., 1990). Эти работы сделаны в конце 80-х в сотрудничестве со специалистами из ИКИ АН СССР. С конца 90-х мы участвуем в анализе данных, получаемых новым поколением американских КА, работавших и работающих на орбите вокруг Марса.

Колориметрический анализ панорам поверхности Венеры

Поверхность Венеры скрыта от наблюдателя сплошным плотным слоем облаков. Увидеть поверхность (в оптическом диапазоне) можно только приблизившись к ней (расчеты показывают, что если опуститься несколько ниже облачного слоя, детали поверхности все равно не будут видны из-за сильного молекулярного рассеяния в чрезвычайно плотных нижних слоях атмосферы). Поверхность Венеры была сфотографирована только в четырех местах посадок спускаемых аппаратов советских АМС «Венера-9» и «Венера-10» (1975 г.) и «Венера-13» и «Венера-14» (1982 г.). Эти панорамы поверхности получены сканирующими телевизионными камерами, причем последние две панорамы цветные, то есть получены в трех фильтрах. В синем фильтре сигнал оказался слишком слабым (в синей области спектра освещенность поверхности мала из-за поглощения в облаках и нижней атмосфере), так что фактически есть панорамы в красном и зеленом фильтрах. В местах посадки АМС «Венера-10» и «Венера-14» поверхность сложена породами, образующими блоки с горизонтальной внешней поверхностью и кое-где заметной слоистой структурой. На панорамах, переданных АМС «Венера-13» (рис. 2.5.4), кроме блоков, значительную площадь занимает сыпучий грунт. На панораме АМС «Венера-9» также присутствует похожий грунт. Нас и наших коллег интересовала информация о составе пород и грунта, которую можно получить из цветных панорам АМС «Венера-13». Разумеется, данные в двух фильтрах не могут дать точный химический или минералогический состав, но некоторые важные выводы удалось сделать (Шкуратов и др., 1987).

Количественный анализ цветных панорам затруднялся тем, что телевизионные камеры не были калиброваны. Для цветовой калибровки камер некоторые части спускаемого аппарата и специальной откидной пластины были покрашены в яркие цвета. Однако, как стало ясно после окончания миссии, под влиянием горячей химически активной атмосферы Венеры краски изменили цвет.

Заметим, что отсутствие надежной калибровки приборов – это вообще типичная проблема, присущая данным, получаемым при помощи космических аппаратов. Причем

дело не только и не столько в том, что обычно нехватка средств и времени не дает возможности хорошо откалибровать прибор перед запуском. Опыт показывает, что после запуска и многомесячного перелета, а в случае спускаемых аппаратов – еще и после торможения и посадки, параметры приборов существенно меняются. Специальные же калибровочные измерения «на месте», как правило, либо принципиально невозможны, либо их очень трудно технически реализовать.

В случае телевизионных панорам поверхности мы в некотором приближении решили проблему калибровки, опираясь на сами телевизионные изображения. Вблизи аппарата поверхность на панораме кажется темнее. Это вызвано тем, что освещенность поверхности вблизи аппарата понижена за счет экранирования неба аппаратом. Предполагая яркость неба одинаковой во всех направлениях и зная размеры и форму аппарата, мы оценили относительную освещенность поверхности как функцию расстояния от оси аппарата. Зная геометрию сканирования и предполагая поверхность горизонтальной, мы рассчитали расстояния от оси аппарата и, следовательно, освещенность для каждого элемента панорамы. Линейная регрессия отсчетов яркости на панораме на рассчитанную относительную освещенность дала нам линейную калибровку с точностью до неизвестного множителя. Строго говоря, предположение об однородности яркости неба не выполняется: в двух верхних углах панорамы видны два маленьких кусочка неба у самого горизонта с противоположных от аппарата сторон, и они имеют несколько различную яркость и цвет. С другой стороны, потемнение вокруг аппарата не обнаруживает явной азимутальной зависимости, а земной опыт показывает, что при сплошной густой облачности и высоком солнце небо весьма однородно. Предположение о линейности калибровки также не является точным, однако это лучшее, что мы могли сделать. Заметим, что наша калибровка не дает абсолютных значений яркости, но дает неплохую оценку их отношений.

Пользуясь нашей калибровкой и скомпенсировав радиальный ход яркости, вызванной экранированием неба, мы получили панораму, откалиброванную в величинах, пропорциональных альбедо поверхности в красном и зеленом фильтрах. Мы построили диаграмму (двумерную гистограмму) альбедо – цвет, которая показана на рис. 2.5.5. Изолиниями на диаграмме показаны частоты встречаемости соответствующих комбинаций логарифма альбедо (в красном фильтре) и показателя цвета, т.е. отношения альбедо в красном и зеленом фильтрах. На диаграмме отчетливо выделяются два кластера, соответствующие породам и грунту. Хорошо видно, что породы и грунт сильно различаются по альбедо (грунт темнее), но одинаковы по цвету. Отсутствие абсолютной калибровки означает, что положение диаграммы по отношению к осям является произвольным, но сама форма диаграммы правильна. Конкретная оцифровка осей на рис. 2.5.5 получена из предположения о том, что среднее альбедо в каждом из фильтров совпадает с оценками, полученными при помощи спектрофотометров АМС «Венера-9» и «Венера-10» (на «Венере-13» такого прибора не было).

Показатель цвета поверхности со сложной структурой определяется не только спектральными свойствами вещества, но и эффективным размером частиц. Для моделирования этого эффекта мы воспользовались моделью спектрального хода альбедо порошкообразных поверхностей (Shkuratov et al., 1999). Эта модель позволяет, задавшись показателями преломления и поглощения, эффективным размером частиц и плотностью упаковки, вычислить альбедо, причем плотность упаковки и показатель преломления слабо влияют на результат. Заметим, что породы, хотя и не являются порошкообразной средой, за счет оптической неоднородности лучше описываются такой моделью с некоторым эффективным размером частиц и высокой плотностью упаковки, чем моделью сплошной однородной среды. Две штриховые линии на рис. 2.5.5 показывают примеры расчетов по модели порошкообразной среды. Линия 1, близкая к типичным значениям яркости и цвета для грунта, получена для отношения показателей поглощения материала в красном и зеленом свете, равном 1,80; вдоль линии меняется размер частиц. Для линии 2, проходящей через кластер пород, отношение показателей поглощения составляет 1,25. Таким образом, мы пришли к парадоксальному на первый взгляд выводу, что одинаковый цвет пород и грунта на панораме означает существенно различный спектральный ход поглощения («показатель цвета по поглощению»). Если мы, понимая ненадежность абсолютной калибровки, сместим диаграмму по отношению к осям на рис. 2.5.5, конкретные значения отношений показателей поглощения изменятся, но качественный вывод останется неизменным: материал грунта по поглощению гораздо краснее, чем материал пород. Для

этого вывода, однако, важно, что поверхность является весьма темной, абсолютные значения альбедо невелики.

Минералогический состав материала определяет спектральный ход коэффициента поглощения, следовательно, различие «цвета по поглощению» указывает на различный минералогический состав грунта и пород. Это различие означает, что грунт не является результатом простого механического выветривания, локального измельчения материала пород. Либо грунт происходит из других районов планеты и занесен в место посадки ветрами, либо он образуется локально за счет химического выветривания, т.е. изменения химического и минералогического состава, которое сопровождается измельчением.

Исследования анизотропии поверхности Венеры по радиолокационным данным

Большой цикл наших работ был связан с анализом радиофизических (радиометрических и радиолокационных) данных, полученных при помощи американского КА «Магеллан». Единственным научным прибором этого аппарата, работавшего на полярной эллиптической орбите вокруг Венеры в 1990 – 1993 г.г., была радиотехническая система, работавшая на длине волны 12,6 см в режимах радиолокационного альтиметра, картирующего радиолокатора бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА), передатчика в бистатических радарных экспериментах и радиометра. В частности, по данным РСА были построены мозаики радарных изображений почти всей поверхности планеты с фактическим разрешением 100 – 200 м (см. примеры на рис. 2.5.6 а и 2.5.7 а), которые революционизировали исследования по геологии Венеры. Одна из наших работ по анализу данных КА «Магеллан» (Креславский и Вдовиченко, 1999), о которой рассказывается ниже, опирается на данные РСА. В отличие от подавляющего большинства работ, использующих мозаики РСА только как изображения для геолого-морфологического анализа и картирования, мы использовали их для количественного анализа.

Мозаики, построенные по данным РСА, представляют пространственное распределение сечения обратного рассеяния поверхности при некотором угле падения зондирующего сигнала θ (рис. 2.5.8), нормированного на среднюю функцию обратного рассеяния всей планеты при том же самом угле падения. Мы называем эту величину радарной яркостью. Нормировка существенна для построения изображений, поскольку обратное рассеяние для большинства ландшафтов на Венере очень круто падает с увеличением θ , а этот угол сильно менялся вдоль орбиты, т.е. с широтой. Средняя функция обратного рассеяния Венеры аппроксимируется следующим выражением [1]:

$$\sigma_M(\theta) = \frac{K_1 \cos \theta}{(\sin \theta + K_2 \cos \theta)^3}, \quad (1)$$

где $K_1 = 0,118$, $K_2 = 0,111$.

Склоны, разрешенные на радарных изображениях, имеют высокую радарную яркость, если они обращены к радару, следовательно, имеют меньший локальный угол падения, и низкую – в противоположном случае. Для горизонтальных поверхностей радарная яркость определяется мелкомасштабной, не разрешаемой структурой поверхности и электромагнитными свойствами ее материала.

Существенная часть поверхности была отснята при помощи РСА дважды или трижды, причем глобальное покрытие выполнено при локации с запада (1-й цикл съемки), а часть мозаик получена при локации с востока (2-й цикл). В результате визуального сравнения мозаик 1-го и 2-го циклов [2] было найдено три лишенные рельефа области, в которых радарные яркости при локации с востока и запада очень сильно отличались (на 7 – 9 дБ, почти на порядок), т.е. обратное рассеяние в этих трех областях является сильно анизотропным. Мы решили провести систематическое количественное исследование анизотропии обратного рассеяния.

На 45° ю.ш. углы падения в 1-м и 2-м циклах были одинаковы и равны 25°. Это позволяет непосредственно интерпретировать разницу радарной яркости для горизонтальных участков как анизотропию. Если углы падения существенно различны, такая разница может также вызываться различной крутизной изотропных функций обратного рассеяния. Поэтому для систематического анализа мы ограничились зоной 40 – 50° ю.ш. Наши оценки показали, что в пределах этой зоны разница радарной яркости за счет возможных вариаций крутизны

функции обратного рассеяния не превосходит 0,5 дБ (12%). Для этой широтной зоны мы построили карты отношения радарной яркости при локации с запада и с востока; для краткости, назовем ниже это отношение просто «разницей». Разумеется, на карте разницы сильно выделяется рельеф, но мы анализировали лишь равнинные участки. Для них характерны вариации разницы, принимающей как положительные, так и отрицательные значения. За исключением одной из трех упомянутых выше областей сильной анизотропии, попавшей в эту зону, разница не превосходит ± 2 дБ (~60%). Сама по себе такая величина наблюдаемой разницы могла бы быть объяснена неучтенным дрейфом параметров радиолокационной системы; более того, наблюдаемые кое-где «ступени» разницы, совпадающие с направлением орбит КА на мозаиках, указывают, что дрейф параметров действительно имел место. Однако тот факт, что границы областей повышенной и пониженной разницы часто совпадают с границами геологических подразделений, видимых на самих радарных изображениях, однозначно указывает на то, что во многих случаях вариации разницы связаны с истинными вариациями анизотропии обратного рассеяния. Таким образом, было обнаружено, что слабая (~1 дБ) анизотропия обратного рассеяния очень широко распространена на Венере.

Мы проанализировали много возможных причин наблюдаемой анизотропии функции обратного рассеяния поверхности (Креславский и Вдовиченко, 1999) и пришли к выводу, что практически единственным разумным объяснением может служить асимметричный рельеф поверхности на масштабах от длины волны до элемента разрешения. В свою очередь, наиболее вероятной, хотя и не единственной причиной формирования асимметричного мелкомасштабного рельефа является действие ветра на сыпучий материал. Например, перемещение ветром сыпучего материала может приводить к его накоплению в ветровой тени препятствий или к образованию микродюн (как предлагалось в [2]), у которых подветренные и наветренные склоны сильно различаются по крутизне. Морфология некоторых объектов, обнаруживающих выраженную слабую анизотропию, однозначно указывает на ветер как причину их образования. Таким образом, обнаруженное широкое распространение слабой анизотропии, вероятно, свидетельствует о широком распространении сыпучего, переносимого ветром материала на поверхности, возможно, такого, как мы видим на панораме (рис. 2.5.4).

Чтобы лучше понять, какого рода асимметричные неровности могут отвечать за наблюдаемую анизотропию обратного рассеяния, была рассмотрена простая модель поверхности с асимметричным пилообразным рельефом (рис. 2.5.8); для краткости будем говорить о микродюнах. Будем считать, что склоны дюн гораздо больше длины волны. Геометрию дюн будем описывать четырьмя параметрами (рис. 2.5.8): крутизна западного склона α , крутизна восточного склона β , азимут оси дюны по отношению к орбите КА ϕ и доля поверхности, занятой дюнами, $f \leq 1$. Сечение обратного рассеяния такой поверхности мы вычисляли как сумму вкладов горизонтальных участков, западных склонов и восточных склонов. При этом мы предполагали, что функция обратного рассеяния каждого участка поверхности описывается формулой (1), где угол θ отсчитывается от нормали к этому участку.

Примеры расчетов приведены на рис. 2.5.9, где разница между модельным сечением обратного рассеяния при наблюдении с запада и с востока показана как функция крутизны западного склона дюн α для некоторых наборов прочих параметров модели. Расчеты показывают, что небольшие (1 – 2 дБ) значения разницы, характерные для широко распространенной слабой анизотропии, могут быть легко достигнуты при самых разнообразных значениях параметров модели, что допускает большое разнообразие возможных эоловых форм рельефа (а не только дюн). В то же время большие (8 – 9 дБ) значения разницы, характерные для трех областей сильной анизотропии, можно получить лишь при сильных ограничениях на параметры модели, в частности, дюны должны занимать существенную площадь ($f \approx 1$), один из склонов должен быть крут, достигая угла осыпания ($\beta \geq \sim 35^\circ$). Это говорит о том, что наиболее вероятными формами мелкомасштабного рельефа в областях сильной анизотропии являются плотные поля микродюн, сформированных при стабильных ветрах и имеющих склоны с крутизной осыпания с подветренной стороны.

Картирование крупномасштабной шероховатости Марса

Большой цикл работ по статистическим характеристикам рельефа Марса на масшта-

бах сотен метров и километров был выполнен в 1999 – 2004 г.г. в соавторстве с Дж. Хэдом, профессором Университета Брауна (Провиденс, США). Исходными данными для этой работы послужили измерения лазерного альтиметра MOLA на борту американского КА «Mars Global Surveyor». КА находился на орбите вокруг Марса, близкой к полярной. Лазерный альтиметр с высокой точностью измерял расстояния между аппаратом и поверхностью в последовательных точках вдоль орбит. Расстояния между последовательными отсчетами альтиметра вдоль орбиты составляли около 300 м на поверхности; каждый отсчет относился к области около 50 м в диаметре. Точность определения расстояния от аппарата до поверхности составляла 30 см для равнинных областей, где в 50 м области характерные перепады высот не превосходили многократно эту точность. Знание орбиты аппарата было несколько хуже, так что абсолютная точность определения высот рельефа составляла порядка нескольких метров. Около 7% отсчетов отбраковывалось в основном за счет отражения от облаков. За время систематической работы прибора (до момента отказа в схеме запуска лазера) было получено более полумиллиарда хороших отсчетов высот. Типичные зазоры между орбитами с измеренными высотами имеют ширины порядка километра, хотя есть много очень близких орбит, а также несколько существенных пробелов. В полярных областях, на широтах 70° – 86° , где большое количество орбит пересекались, увязка орбит позволила построить топографические карты с разрешением около 150 м и вертикальной точностью около 1 м [3]. Данные альтиметра MOLA – это редкий случай в практике анализа данных космических миссий, когда непосредственные результаты эксперимента, представленные научной командой прибора, не требовали никаких дополнительных калибровок. Глобальные карты рельефа с разрешением около 1 км и вертикальной точностью порядка метров, составленные по данным альтиметра, революционизировали исследования по геологии, геодезии и геодинамике Марса. Рельеф почти всей поверхности Марса сейчас известен заметно лучше, чем рельеф значительной части дна земных океанов и некоторых областей земных континентов. Карты рельефа, однако, не используют всю информацию, содержащуюся в полученных данных, так как горизонтальное разрешение и вертикальная точность данных вдоль орбит существенно выше, чем между орбитами. Мы использовали эту информацию для картирования крупномасштабной шероховатости рельефа Марса.

С общей точки зрения, алгоритм картирования шероховатости достаточно прямолинеен. Рассматриваются профили рельефа вдоль орбит. С некоторым шагом вдоль профиля, например, в окрестности каждого отсчета, вычисляется некий параметр, количественно описывающий неровность профиля на некотором характерном горизонтальном масштабе. Иными словами, к профилям применяется некоторый фильтр. Использование различных горизонтальных масштабов позволяет изучать зависимость шероховатости от масштаба. Мы разбиваем поверхность планеты на ячейки, соответствующие элементам (пикселям) карты, собираем вместе все вычисленные значения выбранного параметра неровности профиля, относящиеся к данной ячейке, и, по этому набору значений, оцениваем характерное значение неровности в ячейке. По аналогии с фильтром, алгоритм оценивания характерного значения может быть назван детектором. Изюминкой нашей работы является нетрадиционный и очень удачный выбор меры шероховатости, т.е. выбор фильтра и детектора.

Традиционными характеристиками шероховатости являются, например, структурная функция, т.е. среднеквадратический перепад высот на заданной базе или, что почти то же самое, среднеквадратический уклон на заданной базе. Такой подход к картированию шероховатости по данным MOLA применялся в работе [4]. В этом подходе фильтром является некоторый вариант линейного дифференцирующего фильтра с заданным горизонтальным масштабом, а детектором – усреднение квадратов. Недостатком такого фильтра является то, что он пропускает крупномасштабные, региональные уклоны поверхности, что противоречит интуитивному понятию шероховатости. В указанных работах этот недостаток благополучно устранен вычитанием региональных уклонов, хотя произвольный выбор базового расстояния, на котором вычисляются региональные уклоны, вносит неприятный произвол в определение шероховатости. Гораздо более серьезным и для многих неочевидным недостатком обладает квадратичный детектор. Дело в том, что распределение уклонов рельефа обладает длинными хвостами, т.е. очень крутые уклоны имеют хоть и маленькие, но ненулевые частоты появления. Как мы выяснили, для возвышенностей Марса распределение частот тангенса наклона профиля хорошо аппроксимируется распределением Коши в широком диапазоне уклонов от $0,3^\circ$ до 15° , в частности,

для крутых уклонов частота обратно пропорциональна квадрату тангенса наклона. (Для уклонов положе, чем $0,3^\circ$, распределение более острое, чем распределение Коши, а для уклонов круче, чем 15° , количество данных недостаточно для аппроксимации.) Как известно, для распределения Коши средний квадрат бесконечен, а значит, усреднение квадратов не может служить хорошей мерой шероховатости. На практике, наличие длинных хвостов распределения частот уклонов приводит к тому, что, по мере добавления новых и новых данных в ячейку карты, среднеквадратический уклон в этой ячейке систематически растет.

Другим традиционным методом является преобразование Фурье и усреднение спектра мощности. Легко сообразить, что в этом случае мы снова имеем дело с некоторым линейным фильтром и квадратичным детектором; последний неизбежно приводит ко всем только что описанным неприятностям.

Попробовав традиционные методы и разобравшись с их недостатками, мы, после нескольких попыток, остановились на межквартильной амплитуде кривизны профиля как мере шероховатости. Мы использовали базы, кратные удвоенному шагу между отсчетами высот вдоль профиля, практически, базы в 2, 8 и 32 шага, т.е. 0,6, 2,4 и 9,6 км. В качестве меры локальной неровности в данной точке мы использовали разность между средней высотой в двух точках, расположенных на полбазы вперед и полбазы назад по профилю, и высотой в данной точке (рис. 2.5.10 а):

$$c = \frac{1}{2} [h(x + l/2) + h(x - l/2)] - h(x), \quad (2)$$

где x – расстояние вдоль профиля, l – база и h – высота. Этот линейный фильтр дает, фактически, вторую производную, или кривизну профиля; он не пропускает региональные уклоны. Положительные значения величины c соответствуют вогнутым участкам профиля. Как обычно, дифференцирование экспериментальных данных сильно ухудшает отношение сигнал/шум, однако благодаря уникальной вертикальной точности вдоль орбит данные MOA благополучно выдерживают двукратное дифференцирование. Из всех возможных дважды дифференцирующих линейных фильтров мы выбрали простейший трехточечный, взвесив его принципиальные недостатки и практические преимущества, на которых мы не будем подробно останавливаться; укажем лишь, что для заданной базы он имеет окно минимальной ширины, что приводит к лучшей визуальной резкости получаемых карт. В качестве «детектора» мы применили межквартильную ширину распределения (рис. 2.5.10 в); иными словами, в каждой ячейке карты мы отбросили четверть точек с наиболее выпуклым рельефом и четверть точек с наиболее вогнутым рельефом (тем самым, избавившись от длинных хвостов распределения кривизны) и использовали амплитуду кривизны в оставшейся половине точек. Использование ранговых статистик (таких как квартили) является обычным подходом к статистическому описанию данных, имеющих распределения с длинными хвостами.

Разрешение получаемых карт ограничено пространственной плотностью отсчетов альтиметра и размером окна дифференцирующего фильтра. Наибольшая подробность карт шероховатости, которую нам удалось достичь, составляет 8 пикселей на градус, т. е. примерно 7,5 км на пиксел. Для самой длинной из использованных баз (9,6 км) фактическое разрешение карты несколько хуже, чем размер пиксела. Пример глобальной карты шероховатости для самой короткой базы показан на рис. 2.5.11. Еще одним удачным решением в этой работе стало представление карт шероховатости на трех базах в виде цветной карты. Шероховатость на трех базах (0,6, 2,4, 9,6 км) была закодирована на цветном изображении как интенсивность в трех цветовых каналах (синем, зеленом, красном, соответственно); более высокая интенсивность кодировала более высокую шероховатость; нелинейная, логарифмическая шкала использовалась для того, чтобы отразить вариации шероховатости как в ровных, так и в пересеченных районах. На таких картах общая яркость характеризует общую шероховатость, а цвет качественно показывает характер зависимости шероховатости от масштаба. Например, яркие голубые тона (характерные, например, для обширных областей, покрытых дюнами) говорят о том, что подавляющий вклад в рельеф вносит субкилометровая шероховатость, зеленые тона (типичные для северных равнин) показывают наличие характерного масштаба форм рельефа порядка 3 км, и т.д. Цветные карты шероховатости можно найти в Интернете <http://planetary.brown.edu/rough>.

Цветные карты шероховатости прекрасно отображают различные геолого-морфо-

логические типы местности на Марсе, и оказывают неоценимую помощь при анализе и картировании ландшафтов. Подчеркнем еще раз, что такие карты используют больше информации, чем карты рельефа, поэтому они показывают ландшафтные зоны и их границы лучше, чем анализ текстуры на картах рельефа. Очень интересный и важный эффект, обнаруженный при помощи карт шероховатости, – это глобальное сглаживание субкилометрового рельефа на высоких широтах, хорошо заметное на рис. 2.5.11. Оно, по всей видимости, вызывается наличием содержащих лед покровов на высоких широтах (Kreslavsky and Head, 2002); образование таких покровов связано с изменениями климата Марса (Head et al., 2003).

Интересно сравнить крупномасштабную шероховатость Марса с таким же способом вычисленной шероховатостью различных земных ландшафтов. Самые ровные участки Марса, некоторые относительно молодые вулканические равнины имеют шероховатость того же порядка, что и самые ровные равнины земных континентов, например, Придунайская и Прикаспийская низменности. Самые шероховатые участки Марса сравнимы с Карпатами и существенно уступают по шероховатости Кавказу и Альпам. Для Марса характерны значительно более разнообразные зависимости шероховатости от масштаба.

Обнаружение сильной анизотропии крутых склонов на Марсе

Потенциальные возможности данных MOLA для картирования статистических характеристик рельефа существенно шире, чем карты шероховатости, рассмотренные выше. Например, тот же самый фильтр с другим детектором использовался для картирования степени выпуклости (или вогнутости) рельефа. Здесь мы подробнее остановимся на работе по статистическому описанию асимметрии рельефа (Kreslavsky and Head, 2003).

Из-за того что аппарат находился на орбите, близкой к полярной, профили MOLA ориентированы под небольшим углом к меридиану. Это позволяет статистически сравнить крутизну склонов, обращенных на север и на юг. Мы использовали процедуру картирования, сходную с описанной выше. В качестве фильтра мы использовали выражение:

$$s = [h(x + l) - h(x)] - \frac{1}{3} [h(x + 2l) - h(x - l)]. \quad (3)$$

Фактически, это разность уклонов на базе l и на базе $3l$ (рис 2.5.10 б); будем называть эту величину дифференциальным уклоном. Если мы рассматриваем все профили в направлении с юга на север, то положительные s отвечают склонам, обращенным на юг, а отрицательные – на север. Мы использовали самую короткую из возможных баз $l = 0,3$ км. Ширина (например, межквартильная) распределения дифференциальных уклонов может служить мерой шероховатости. Если рельеф статистически изотропный, распределение дифференциальных уклонов будет симметрично относительно нуля. Существенная несимметричность распределения свидетельствует об анизотропии рельефа. В качестве параметра асимметрии мы выбрали медиану распределения, деленную на его межквартильную ширину (рис. 2.5.10 в). Медиана характеризует общее отклонение центра распределения от нуля, нормировка на ширину необходима, поскольку мы хотим сравнивать формы распределения как для ровных, так и для шероховатых областей. Положительная асимметрия означает, что суммарная длина участков профилей, обращенных к югу, больше, чем обращенных к северу, что, в свою очередь, означает, что в среднем склоны, обращенные к северу, круче, чем обращенные к югу. Аналогично, отрицательная асимметрия означает, что обращенные к югу склоны круче.

Полученная карта асимметрии склонов показана на рис. 2.5.12. Видно, что уровень шума параметра асимметрии очень велик. Для большей части планеты асимметрия колеблется около нуля. Несколько небольших участков систематически отрицательной асимметрии в северной приполярной области являются полями дюн, и анизотропия их рельефа прекрасно видна на изображениях высокого разрешения. Несколько участков систематически отличной от нуля асимметрии находятся в экваториальной зоне. Здесь анизотропия рельефа, скорее всего, тоже связана с действием ветра; она, однако, совершенно не очевидна на снимках высокого разрешения и ждет дальнейшего анализа. Наиболее интригующими областями анизотропного рельефа являются два узких пояса, примерно совпадающих с параллелями 47° в обоих полушариях, причем знак асимметрии в северном и южном полушариях противоположный: склоны, обращенные к экватору, круче, чем склоны, обращенные к полюсам. Эта симметрия полушарий и строгая широтная

зональность однозначно указывают, что первичная причина анизотропии так или иначе связана с климатом.

Чтобы лучше понять природу поясов анизотропии, мы рассмотрели большой, по возможности геологически однородный регион (Земля Киммерии) в возвышенностях южного полушария Марса и построили распределения дифференциальных уклонов в зависимости от широты. Рисунок 2.5.13 показывает баланс дифференциальных уклонов разного знака как функцию широты для уклонов различной крутизны. Параметр асимметрии, закартированный на рис. 2.5.12, относится, по методу определения, к уклонам наиболее типичной крутизны; для возвышенностей это уклоны в $1 - 2^\circ$. Широтные зависимости (рис. 2.5.13) для такой крутизны показывают пояс небольшого (несколько процентов) дисбаланса, и именно этот небольшой дисбаланс виден на карте (рис. 2.5.12). Из рис. 2.5.13 видно, что этот небольшой дисбаланс типичных уклонов является в некотором роде побочным, вторичным эффектом, он компенсирует значительно более сильный дисбаланс (противоположного знака) значительно более редких крутых склонов. Среди самых крутых склонов на широте 47° обращенные на север склоны встречаются втрое чаще, чем обращенные на юг.

Обнаруженная сильная асимметрия крутых дифференциальных уклонов побудила нас более детально проанализировать распределение крутых склонов различной ориентации, и мы обнаружили, что описанная выше сильная асимметрия крутых склонов сопровождается еще более сильным эффектом. Рисунок 2.5.14 показывает широтную зависимость количества крутых склонов на единицу площади для того же самого региона (Земля Киммерии). На высоких широтах крутые склоны практически отсутствуют. Если мы движемся от экватора к полюсу, количество крутых склонов падает более чем на два порядка, причем это падение происходит раньше, т.е. на более высоких широтах, для склонов, обращенных к полюсу, и позже – для противоположных склонов, что и порождает обнаруженную ранее асимметрию. Вне Земли Киммерии существенные ландшафтные вариации усложняют картину, однако эффект столь силен, что он отлично прослеживается по всей планете, в обоих полушариях.

Крутые склоны образовывались в течение геологической истории Марса за счет тектонических процессов, эрозионных процессов и образования ударных кратеров. Последний процесс порождает крутые склоны непрерывно и повсеместно. Поэтому практически полное отсутствие крутых склонов на высоких широтах означает, что существует некоторый механизм удаления крутых склонов, действующий только на высоких широтах (причем сами кратеры и прочие формы рельефа не удаляются, но их склоны становятся много положе). Поскольку этот механизм имеет строгую широтную зональность, он необходимо связан с климатом; поскольку он чувствителен к ориентации склона, он непосредственно связан с инсоляцией, т.е. с режимом освещения Солнцем. Географически высокоширотные области без крутых склонов почти совпадают с областями пониженной субкилометровой шероховатости (описанной выше). Не следует, однако, безапелляционно отождествлять эти два эффекта. Параметр шероховатости имеет дело с типичными уклонами поверхности, которые, даже для шероховатых областей, не превосходят $1 - 2^\circ$; соответственно, вертикальный масштаб рельефа, ответственный за высокоширотное сглаживание, составляет порядка нескольких метров. Деграция крутых склонов связана с вертикальными изменениями рельефа порядка сотен метров. Таким образом, отсутствие крутых склонов и сглаживание пологого субкилометрового рельефа вполне могут быть не связаны генетически.

Механизм, удаляющий крутые склоны на высоких широтах, – это, вероятно, сезонное оттаивание поверхности на высоких широтах в особые эпохи в геологическом прошлом. В настоящее время поверхность Марса находится в глубоко замерзшем состоянии. Несмотря на то, что в сезон перигелия на низких широтах в послеполуденное время температура поверхности достигает $+20 - +35^\circ\text{C}$, среднесуточная температура поверхности нигде на планете никогда не превышает -20°C , поэтому оттаивать днем может только очень тонкий приповерхностный слой (фактически, всюду, где дневная температура превышает 0°C , верхний слой грунта совершенно лишен льда, и переход температуры через 0°C не вызывает, как считается, никаких особых эффектов). Небесномеханические расчеты показывают, что наклон оси вращения Марса к плоскости его орбиты (равный $\sim 25^\circ$ в нынешнюю эпоху) меняется сложным образом [5]; хаотическая природа динамики Солнечной системы делает невозможными точные расчеты этих изменений, однако ясно, что в прошлом весьма вероятны периоды, когда наклон оси вращения был существенно выше, чем сейчас. Инсоляция, а, следовательно, температура поверхности на низких широтах слабо зависит от наклона оси вращения. На высоких широтах при большом наклоне оси

вращения летом инсоляция поверхности велика, и среднесуточная температура должна превышать 0°C (скорее всего, для этого требуются наклоны более ~40 – 50°; среднегодовая же температура поверхности всегда остается много ниже 0°C). Сезонное оттаивание и промерзание слоя толщиной в дециметры и метры способствует дезинтеграции пород и интенсивной эрозии, так же, как это происходит в областях вечной мерзлоты на Земле, и способствует интенсивной деградации крутых склонов. При большом наклоне оси вращения на средних широтах летом крутые склоны, обращенные к полюсу, получают существенно большую инсоляцию, чем склоны, обращенные к экватору. (Это противоположно нашему интуитивному представлению о теплых южных и холодных северных склонах, причем не столько потому, что наша планета имеет меньший наклон оси вращения, сколько потому, что мы обращаем внимание на разницу между южными и северными склонами не летом, а ранней весной, когда сходит снег.) Благодаря большей летней инсоляции на склонах, обращенных к полюсам, граница сезонного оттаивания для таких склонов продвинута ближе к экватору, что и вызывает несимметричную деградацию склонов.

Панорамная поляриметрия Марса при помощи телескопа Хаббла

Цикл работ по обработке изображений Марса, полученных при помощи орбитального Космического телескопа Хаббла (HST) (Shkuratov et al., 2005, Kaydash et al., 2006) имеет гораздо более «астрономический» характер. Представитель харьковских астрономов (Ю. Г. Шкуратов) входил в команду астрономов и планетологов, возглавляемую проф. Дж. Бэллом из Корнельского университета, выигравшую конкурс на наблюдательное время на HST для наблюдений Марса в противостояние 2003 г. В рамках этой программы харьковчане отвечали за анализ поляриметрических наблюдений Марса.

Были выполнены пять серий наблюдений: 24 августа, непосредственно перед противостоянием, а также после него, 5, 7, 12 и 15 сентября. Фазовые углы Марса составляли 6,4°, 8,2°, 9,7°, 13,6° и 15,9°, соответственно. Время наблюдений было выбрано так, чтобы к Земле было обращено одно и то же полушарие Марса (центр видимого диска имел координаты 19° ю.ш., 20 – 35° з.д.). Наблюдения проводились при помощи приемника HRC камеры ACS. Приемник представляет собой уникальную ПЗС-матрицу с высокой чувствительностью и отношением сигнал/шум размером в 1 мегапиксел. Диаметр диска Марса на приемнике изменялся в течение периода наблюдений от 1010 до 950 пикселов; масштаб изображения в центре диска был порядка 7 км на пиксел, и фактическое разрешение было того же порядка. Это рекордное разрешение на Марсе, полученное астрономическими методами с Земли; полученные изображения – это единственные астрономические изображения, на которых различима Долина Маринера и некоторые крупные ударные кратеры.

Поляриметрическая часть программы наблюдений в каждой из пяти серий включала изображения в четырех широких спектральных фильтрах F250W, F330W, F435W и F814W; число в идентификаторе фильтра соответствует характерной длине волны в нм, таким образом, набор фильтров включал два УФ, голубой и ИК фильтры. Минимальная технически возможная экспозиция оказалась слишком длинной для ИК фильтра, яркие детали вышли из динамического диапазона приемника, поэтому ИК изображения были мало пригодны для дальнейшего количественного анализа. Пример изображения в голубом фильтре показан на рис. 2.5.15. Уменьшенные изображения в ближнем УФ фильтре из всех пяти серий наблюдений показаны на рис. 2.5.15 (верхний ряд). В южной части диска видна сезонная полярная шапка, которая уменьшается в размерах в течение периода наблюдений. Высокие северные широты скрыты плотной облачностью. Контраст деталей на поверхности в УФ фильтрах существенно ниже, чем в голубом, за счет сильного рассеяния и поглощения в атмосфере. В центральной и западной (утренней) части диска наблюдаются обширные системы очень неплотных, светлых, часто полупрозрачных облаков; их плотность и конфигурация меняются от даты к дате.

В каждом из четырех спектральных фильтров было получено по три изображения с тремя различными поляризационными фильтрами, поляризационные оси которых повернуты на 60° друг к другу. Нашей задачей было картирование степени линейной поляризации на основе этих изображений. Обработка данных начиналась со стандартной процедуры первичной калибровки изображений, которая включала компенсацию темнового заряда, плоского поля и геометрических искажений. Затем мы применили специально для этого разработанные эвристические алгоритмы обнаружения треков космических лучей на

изображениях. Стандартная программа калибровки изображений камеры ACS предусматривает обнаружение треков на основе сравнения двух и более идентичных экспозиций одного и того же участка неба. К Марсу эта часть стандартной программы неприменима, поскольку Марс движется и поворачивается между последовательными экспозициями. После этого мы совместили между собой каждую тройку изображений. Эта задача также оказалась нетривиальной: Марс поворачивается между экспозициями, а точность знания положения HST на околоземной орбите и, следовательно, горизонтального параллакса Марса не достаточна для того, чтобы рассчитать требуемую геометрическую трансформацию с нужной точностью. Нам пришлось уточнять совмещение, пользуясь видимыми деталями на поверхности. Для этого мы использовали оригинальный алгоритм, максимизирующий локальную корреляцию изображений. Наконец, на основании небольших разностей между тройкой изображений, полученных в разных поляризационных фильтрах, мы вычисляли степень линейной поляризации.

Камера ACS не проектировалась как специальный поляриметрический инструмент. Она находится в боковом фокусе телескопа; свет отводится в этот фокус зеркалом, расположенным под большим углом к оптической оси, что порождает очень сильную (до 9%) инструментальную поляризацию. Зеркало имеет сложное диэлектрическое покрытие, из-за которого инструментальная поляризация имеет сильную и немонотонную спектральную зависимость. При сборке камеры положение осей поляризационных фильтров не было задокументировано, и, следовательно, позиционные углы плоскостей поляризации фильтров в поле зрения камеры неизвестны. Из сказанного, с учетом того, что степень поляризации Марса при небольших фазовых углах не превосходит нескольких процентов, ясно, что поляриметрическая калибровка наблюдений представляла собой наибольшую проблему в нашей работе. Усилия создателей камеры по поляриметрической калибровке до настоящего момента не привели к результату, которым мы могли бы надежно воспользоваться. Однако некоторое количество специальных калибровочных наблюдений было проведено, и мы воспользовались ими для того, чтобы откалибровать наблюдения. К наблюдениям стандартных звезд мы добавили сами наблюдения Марса: соображения симметрии требуют, чтобы в центре диска плоскость поляризации либо совпадала, либо была перпендикулярна плоскости падения, что дает дополнительное условие для калибровки, особо важное, поскольку в этом случае спектры объекта и стандарта совпадают. Мы отказались от построения адекватной модели, учитывающей поляризацию на главном зеркале, на отклоняющем зеркале и в фильтрах, как это пытаются сделать создатели камеры, и рассмотрели всю систему, состоящую из телескопа, фильтра и приемника как линейный «черный ящик». Поскольку круговая поляризация Марса пренебрежимо мала, линейная связь между тремя параметрами Стокса, описывающими интенсивность и состояние линейной поляризации источника, и тремя отсчетами яркости в трех поляризационных фильтрах, описывается матрицей 3×3 из 9 элементов. Имеющихся калибровочных наблюдений недостаточно для определения этих 9 элементов. Если мы учтем, что степень поляризации объекта мала, и будем интересоваться только состоянием поляризации, а не абсолютной яркостью, то окажется достаточно всего 4-х нетривиальных параметров, описывающих «черный ящик». Калибровочных наблюдений с избытком хватает для определения этих параметров, причем наблюдения оказываются сильно несовместными друг с другом. Причина этого кроется в сильной разнице спектров стандартных звезд и сильной спектральной зависимости инструментальной поляризации. После того, как мы исключили самую голубую из стандартных звезд, калибровочные наблюдения стали неплохо согласоваться между собой, что позволило нам определить параметры «черного ящика» и тем самым откалибровать карты поляризации.

Полученные карты поляризации показаны на рис. 2.5.16 (нижний ряд); более светлые тона показывают более сильную отрицательную поляризацию. В синем фильтре, где вклад поверхности велик, южная полярная шапка поляризует рассеянный свет существенно слабее, чем прочие части диска, как следовало ожидать для объекта с высоким альбедо. В УФ фильтрах эта разница в поляризации шапки слабее, поскольку вклад поверхности в рассеянный свет меньше. Никаких других пространственных вариаций степени поляризации, которые мы могли бы отнести к деталям поверхности, мы, к нашему разочарованию, не обнаружили. Зато слабые утренние облака подарили нам неожиданно сильный эффект: некоторые области в западной половине диска 5 и 7 сентября показали исключительно сильную отрицательную поляризацию. Эффект особенно сильно

проявляется в УФ фильтрах, поляризация местами доходила до 2,5 %. Изменчивый характер этих аномальных областей однозначно указывает на атмосферные аэрозоли, причем скорее на кристаллы льда, способные конденсироваться и испаряться, чем на пыль. На УФ изображениях хорошо видно, что сильно поляризованные области ассоциируются с некоторыми полупрозрачными облаками, но не со всеми; плотные облака не проявляют аномальной поляризации. В синем фильтре аномальная поляризация слабее, а облака местами совсем прозрачны. Низкая оптическая плотность и высокая степень поляризации указывают на удивительно высокую поляризующую способность частиц аэрозоля, что потенциально может наложить существенные ограничения на размеры и свойства частиц. Дальнейший теоретический анализ этих наблюдений может дать важные результаты для понимания микрофизики марсианских облаков и, как следствие, для моделирования климата.

Уникальное разрешение и качество наблюдений Марса на телескопе Хаббла открыло еще один путь для обработки и анализа (Kaydash et al., 2006). В фильтре F330W хорошо видна тонкая структура утренних облаков. За 4 минуты между первой и последней (третьей) экспозицией в различных поляризационных фильтрах облачные структуры заметно смещались по отношению к деталям поверхности. Эти смещения были невелики, порядка 1 – 3 пиксела, однако, поскольку тонкая структура облаков не успевала измениться за это короткое время, используя большие окна (практически, 50 пикселов в диаметре), нам удалось измерить смещения с точностью существенно выше, чем один пиксел (в обмен на снижение пространственного разрешения). Мы использовали наши алгоритмы совмещения по максимуму взаимной корреляции изображений; повозившись с подбором параметров этой процедуры, нам удалось определить смещения в 650 точках за все 5 дней наблюдения.

Смещения облаков вызываются ветром. В принципе, это не всегда так: видимые смещения облаков могут быть не связаны с механическим перемещением аэрозолей вместе с воздушными массами; это может быть процесс типа волнового, т.е. смещение фронтов конденсации и испарения. Однако в нашем случае, поскольку сохраняется тонкая структура облаков и скорость перемещения велика, мы почти наверняка имеем дело с ветром. Измеренные смещения позволили построить карты ветров (рис. 2.5.17 A-E). Типичные измеренные скорости ветра составляют ~ 40 м/с; хотя точность наших измерений невелика (~ 10 м/с по скорости, ~ 15° по направлению), карты показывают систематические региональные изменения скорости ветра и различия в полях ветров в различные дни наблюдений.

Эти карты дают скорость ветра на высоте облаков, которая неизвестна. Мы сравнили полученные нами поля скоростей с данными из Климатической базы данных Марса (<http://www.lmd.jussieu.fr/mars.html>), которая дает «среднемесячные» значения скоростей ветра для данного сезона и времени суток на разных высотах (рис. 2.5.17 F). Эта база данных получена по расчетам при помощи числовой модели циркуляции атмосферы; параметры этой модели подогнаны так, чтобы модель удовлетворяла большинству доступных погодных данных. Глобально, преобладание восточных ветров по нашим измерениям согласуется с базой данных. Скорость ветра растет с высотой, и по средней скорости восточных ветров видно, что облака находятся на высотах 30 – 40 километров. Наблюдаемые отличия поля скоростей ветра на этих высотах для пяти дат наблюдений друг от друга и от «среднемесячных» значений отображают погодные вариации. Измеренные поля ветров могут быть использованы для дальнейшего детального анализа совместно с моделями циркуляции атмосферы.

Заключительные замечания

Работы по обработке данных космических миссий продолжаются. Общий объем данных о планетах быстро растет, грубая оценка показывает, что в среднем за последние 5 – 7 лет он утраивается за год. Авторы космических экспериментов, «хозяева» данных, все менее и менее углубляются в детальный количественный анализ, ограничиваясь «снятием сливок», публикацией наиболее интересных и ярких, но лишь очевидных и поверхностных результатов. В ближайшие год-два поток данных достигнет такого уровня, когда времени исследователей не будет хватать для того, чтобы просто просмотреть приходящие данные. Огромное количество интереснейших фактов останется закопанным в мегабайтах чисел. К счастью, политика космических агентств США и Европейского союза (NASA и ESA) такова, что все получаемые данные о планетах быстро становятся доступными для независимого

анализа. В этих условиях у харьковских ученых, аспирантов и студентов есть широчайшие возможности, немного копнув вглубь, добывать новые удивительные результаты и вносить существенный вклад в мировую планетологию.

Литература

- [1] *Muhlemann D. O.* Radar scattering from Venus and the Moon // *Astron. J.* – 1964. – V. 69. – P. 34 – 41.
- [2] *Weitz C. M., Plaut J. J., Greeley R. Saunders R. S.* Dunes and microdunes on Venus: Why were so few found in the Magellan data? // *Icarus.* – 1994. – 112. – P. 282-295.
- [3] *Neumann G. A., Rowlands D. D., Lemoine F. G., Smith D. E., Zuber M. T.* Crossover analysis of Mars Orbiter Laser Altimeter data // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106. – P. 23753-23768.
- [4] *Orosei R., Bianchi R., Coradini A., Espinasse S., Federico C., Ferriccioni A., Gavrishin A. I.* Self-affine behavior of Martian topography at kilometer scale from Mars Orbiter Laser Altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2003. 108 No. E4, DOI: 10.1029/2002JE001883.
- [5] *Laskar J., Correia A., Gastineau M., Joutel F., Levrard B., Robutel P.* Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars // *Icarus.* – 2004. – 170. – P. 343-364.

2.6. РАССЕЯНИЕ СВЕТА ПОВЕРХНОСТЯМИ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

д.ф.-м.н. Ю. Г. Шкуратов, к.ф.-м.н. Д. В. Петров, к.ф.-м.н. Д. Г. Станкевич,
к.ф.-м.н. Е. С. Зубко, к.ф.-м.н. Е. С. Гринько

Поверхность Луны и других безатмосферных небесных тел покрыта слоем реголита – порошкообразным материалом, который образовался в результате метеоритной и микрометеоритной бомбардировки этих тел. Поверхность безатмосферных тел имеет случайный многомасштабный рельеф. Одной из основных форм этого рельефа являются кратеры. При изучении физических свойств таких поверхностей важно понимать, как рассеивают свет случайно шероховатые порошкообразные поверхности, состоящие из частиц разных размеров и случайной формы, и, в дополнение, – осложненные рельефом. Для этого в Харьковской обсерватории давно проводятся теоретические исследования, направленные на моделирование оптических свойств планетных поверхностей. Наиболее важной для практики является задача исследования зависимости оптических параметров от фазового угла. Первые попытки теоретического моделирования угловых зависимостей яркости были предприняты Н. П. Барабашовым в 20-30-е годы прошлого века. Это моделирование основывалось на расчете затенений, создающихся углублениями различных детерминированных форм (трещины трапецевидного профиля, сферические лунки и т.д.). Эти модели плохо описывали наблюдательные данные. Позднее, модели усложнялись, однако добиться хорошего совпадения с экспериментом так и не удалось. В 60-70-х годах получили развитие модели затенений на случайном рельефе. Статистический подход для описания планетных поверхностей оказался гораздо более продуктивным и адекватным. Большой вклад в развитие этой концепции внес Л. А. Акимов. Им же развивался механизм оптической концентрации света на источник, отличный от теневого механизма. Ниже мы рассмотрим физические причины угловых зависимостей яркости поверхностей со сложной структурой более детально.

Механизмы формирования фазовой функции

Существует несколько механизмов, которые формируют фазовую зависимость яркости безатмосферных небесных тел (Луны, астероидов и т.п.). Основной причиной падения яркости поверхности таких тел с ростом угла фазы является теневой эффект. Многократное рассеяние света между частицами реголита и элементами рельефа поверхности может отчасти ослабить это падение. Заметный вклад в фазовый ход яркости вносит однократное рассеяние частицей. В области малых углов фазы для ярких участков поверхности, возможно, проявляется так называемый эффект когерентного усиления обратного рассеяния. Рассмотрим эти факторы подробнее.

Структура лунной поверхности зависит от масштаба ее рассмотрения. На масштабах деkamетры – метры (мезорельеф) лунная поверхность может быть описана случайной функцией (рис. 2.6.1); в масштабах десятков микрон – миллиметров (микрорельеф) она представляет собой порошкообразную среду, реголит (рис. 2.6.2). Таким образом, каждый элемент мезорельефа лунной поверхности имеет структуру дискретной среды. Теневой эффект для статистического рельефа и порошкообразных сред проявляется по-разному. В обоих случаях для описания теневого эффекта вводится так называемая теневая функция. Она характеризует зависимость относительной доли незатененной площади поверхности от углов i , ϵ и α . Для статистически шероховатых поверхностей и порошкообразных сред (когда считается справедливым приближение геометрической оптики) теневые функции оказываются разными.

Для примера на рис. 2.6.3 показана теневая функция поверхности со значением среднеквадратичного наклона элементов шероховатости $\sigma = 0,577$, что соответствует углу 30° . Эта поверхность визируется вдоль средней нормали; угол падения изменяется, т.е. он равен фазовому углу. Как видно, для данного рельефа при малых углах падения света (когда

падающие лучи близки к средней нормали поверхности, фазовый угол около нуля) затенений практически не наблюдается. Они наступают только при пологом освещении шероховатой поверхности (зависимость становится крутой). В принципе, статистически неровные поверхности могут давать крутую зависимость теневой функции и при малых фазовых углах. Это может быть, если падающий и отраженный луч лежат в плоскости (плоскость рассеяния), которая отклонена на большой угол от средней нормали поверхности. Такое наблюдается, например, в зоне фотометрических полюсов планетных тел. Затененные области могут подсвечиваться освещенными элементами поверхности (рис. 2.6.1), ослабляя теневой эффект. Однако, как показали расчеты, для шероховатых поверхностей даже с высоким альбедо вклад многократного рассеяния невелик, если характерный наклон поверхности меньше 40° (Shkuratov et al., 2005).

Среды, состоящие из частиц, допускающие геометрикооптическое приближение, демонстрируют крутые зависимости теневой функции при малых фазовых углах (рис. 2.6.2) при любых наклонах плоскости рассеяния относительно средней нормали поверхности. На рис. 2.6.3 показана теневая зависимость для случая среды с плотностью 0,3 (30% объема занято веществом). Поверхность визируется вдоль средней нормали, а угол падения равен фазовому углу, т.е. используется та же геометрия светорассеяния, что и в случае шероховатой поверхности. Как видно, поведение теневых функций среды и неровной поверхности существенно различается при малых и средних углах фазы, тогда как при больших углах обе структуры обнаруживают сильный теневой эффект. Многократное рассеяние света в реголите вносит заметный вклад. Некоторые частицы реголита полупрозрачны; свет, проходя сквозь них или рассеиваясь другими частицами, ослабляет теневой эффект.

Фактор многомасштабности и иерархичности строения играет важную роль в формировании теневой и, следовательно, фотометрической функции поверхностей безатмосферных небесных тел. На необходимость использования нескольких референц-поверхностей с разными масштабами шероховатостей неоднократно указывал Барабашов (1961, 1970). Много позднее был получен еще один важный результат. Было показано, что формула Акимова (см. раздел 2.1) является прямым следствием фактора многомасштабности шероховатостей (Шкуратов, 1995, 1996, Shkuratov et al., 2003).

Многомасштабность проявляется следующим образом. Представим себе шероховатую поверхность. Ее фазовая зависимость формируется теневым эффектом и фазовой зависимостью элементов этой поверхности. Если эти элементы также шероховаты, то их фазовая функция формируется теневым эффектом и фазовой функцией элементов рельефа мелкомасштабной шероховатости и т.д. Получается иерархия шероховатостей, которая мультиплицирует теневой эффект, резко увеличивая крутизну фазовой зависимости.

Существенный вклад в обратное рассеяние порошкообразной поверхности (особенно при низких альбедо) может вносить однократное (точнее, одночастичное) рассеяние. Лабораторные измерения и расчеты показывают, что частицы и шероховатости случайной формы размером порядка длины световой волны дают после усреднения по ориентациям и формам небольшое увеличение рассеянного потока при углах фазы менее $30 - 40^\circ$.

В случае ярких порошкообразных поверхностей может наблюдаться эффект когерентного усиления обратного рассеяния. Этот интерференционный эффект был впервые рассмотрен в астрономическом контексте в работе (Шкуратов, 1985). В частности, в работах (Шкуратов, 1985, 1989) впервые дано объяснение эффекту отрицательной поляризации света на основе механизма когерентного усиления обратного рассеяния.

Описываемый эффект обусловлен тем, что любая траектория лучей, испытавших рассеяние в среде кратности выше первой, может интерферировать со взаимно обратной траекторией (см. рис. 2.6.4). При строго нулевом фазовом угле лучи, прошедшие по этим траекториям, всегда интерферируют с усилением, поскольку их оптический путь один и тот же. При угле фазы, не равном нулю, эти пути отличаются друг от друга и могут интерферировать как с усилением, так и со взаимным гашением. Таким образом, при рассеянии направление на источник света является выделенным. Интерференция ответственна за существование оппозиционного эффекта (узкого пика яркости). Этот эффект по своей природе универсален. Он проявляется везде, где есть рассеяние волн, в том числе и волн де Бройля. В физике твердого тела сходные эффекты называются эффектами слабой локализации (например, в теории проводимости это андерсоновская локализация). Скалярная теория рассеяния предсказывает максимальную амплитуду когерентного усиления обратного рассеяния, равную 2. Более строгая векторная модель показывает, что эта

максимальная амплитуда может быть около 1,5 (по крайней мере, меньше 2). Величины всплесков с амплитудой около 50 % встречаются в лабораторных измерениях при очень малых углах фазы. Эффект когерентного усиления обратного рассеяния отчетливо проявляется у ледяных спутников планет и колец Сатурна. Следует отметить, что в случае Луны этот эффект проявляется, вероятно, только для участков поверхности с высоким альбедо; это могут быть зоны вскрытия незрелого материкового грунта (молодые кратеры и лучи).

Теневой эффект непрерывных случайно шероховатых поверхностей

Теневой эффект является главным в формировании фотометрических свойств Луны и других безатмосферных тел. Его влияние особенно велико при больших фазовых углах. Даже в случае светлых поверхностей (ледяные спутники), когда развито многократное рассеяние, ослабляющее контраст теней, влияние теневого эффекта существенно. В масштабах, значительно превышающих размеры частиц реголита, планетная поверхность осложнена случайным рельефом (мезорельефом). В общем случае этот рельеф описывается неоднозначной случайной функцией. Неоднозначность функции рельефа в основном определяется наличием камней и крупных агрегатов реголитовых частиц. Расчет затенений на такой поверхности является очень сложной задачей. Даже при упрощающих допущениях эти расчеты сложны. Тем не менее, модели затенения статистически неровными поверхностями – тема ряда работ сотрудников нашего НИИ на протяжении многих лет.

Это теоретическое направление было начато работами Н. П. Барабашова, который рассматривал затенения на некоторых детерминированных структурах, таких как борозды с трапецевидным профилем, бугры конической и полусферической формы и т.п. (Барабашов, 1923, 1970). Конечно, использование таких структур в качестве моделей можно рассматривать лишь как грубое приближение. Более адекватным представляется использование статистических подходов к решению задачи затенений планетными поверхностями. Для этого в качестве модели поверхности следует использовать случайные функции. Впервые такой подход был применен харьковскими физиками Ф. Г. Бассом и И. М. Фуксом в связи с необходимостью расчета затенений на взволнованной морской поверхности [1].

Статистический подход использует бесконечномерную плотность распределения высот поверхности, которая описывается однозначной дифференцируемой случайной функцией $z = \xi(x, y)$:

$$W_{\infty}^2 = \lim_{\substack{y \rightarrow \pm\infty \\ x \rightarrow \pm\infty}} \lim_{\substack{\Delta y \rightarrow 0 \\ \Delta x \rightarrow 0}} W_{\chi\gamma}(\xi(x_0, y_0) \dots \xi(x_0 + m\Delta x, y_0 + k\Delta y)) \quad (1)$$

где m и k – целые от 1 до $\chi = [x/\Delta x]$ и $\gamma = [y/\Delta y]$, соответственно, [...] – антье, x_0, y_0 – координаты некоторой произвольной начальной точки на плоскости отсчета. Пусть в точке с координатами (z_0, y_0, x_0) поверхность прерывает падающий луч и дает начало уходящему (рассеянному) лучу.

Рассмотрим вероятность $P(E_i)P(E_\varepsilon|E_i)$, где E_i – событие, соответствующее падению луча из бесконечности в точку поверхности с координатами (z_0, y_0, x_0) под углом i к средней плоскости, E_ε – событие, соответствующее выходу луча из этой точки на бесконечность под углом ε к средней плоскости; $P(E_i)$ – вероятность события E_i ; $P(E_\varepsilon|E_i)$ – условная вероятность того, что событие E_ε имеет место, если произошло E_i . В силу теоремы Байеса $P(E_i)P(E_\varepsilon|E_i) = P(E_i \cap E_\varepsilon)$, где $P(E_i \cap E_\varepsilon)$ – вероятность того, что точка с координатами (z_0, y_0, x_0) одновременно и видна и освещена. События E_i и E_ε равносильны тому, что все точки поверхности, лежащие вдоль следа лучей, расположены ниже лучей, при условии, что высоты поверхности в других точках могут быть расположены в диапазоне $(-\infty, +\infty)$. Это можно выразить следующим образом:

$$P(E_i \cap E_\varepsilon) = \lim_{\substack{r_i \rightarrow \infty \\ r_\varepsilon \rightarrow \infty}} \lim_{\substack{\Delta r_i \rightarrow \infty \\ \Delta r_\varepsilon \rightarrow \infty}} \left\{ \prod_{k=1}^{\nu} \int_{-\infty}^{z_0 + k\Delta r_i \operatorname{ctgi}} d\xi_{ik} \prod_{j=1}^{\mu} \int_{-\infty}^{z_0 + j\Delta r_\varepsilon \operatorname{ctge}} d\xi_{\varepsilon j} \left[\lim_{\substack{y \rightarrow \pm\infty \\ x \rightarrow \pm\infty}} \lim_{\substack{\Delta y \rightarrow \pm\infty \\ \Delta x \rightarrow \pm\infty}} \left[\prod_{l=1}^{\chi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_l \prod_{m=1}^{\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_m \Gamma W_{\chi\gamma} \right] \right] \right\}, \quad (2)$$

где ξ_{ik} и $\xi_{\varepsilon j}$ – высоты вдоль следов лучей на поверхности, r_i и r_ε – расстояния на плоскости отсчета от точки (x_0, y_0) вдоль лучей, $\nu = [r_i/\Delta r_i]$ и $\mu = [r_\varepsilon/\Delta r_\varepsilon]$. Функционал Γ используется

для исключения интегрирования в бесконечных пределах в точках вдоль следов лучей. Символ $\prod \int$ обозначает многократное (в пределе непрерывное) интегрирование [1]. Полное интегрирование в формуле (3) понижает порядок плотности $W_{\infty 2}$, что ведет к следующей формуле:

$$P(E_i \cap E_\varepsilon) = \lim_{\substack{r_i \rightarrow \infty \\ r_\varepsilon \rightarrow \infty}} \lim_{\substack{\Delta r_i \rightarrow \infty \\ \Delta r_\varepsilon \rightarrow \infty}} \left\{ \prod_{k=1}^v \int_{-\infty}^{z_0 + k \Delta r_i \operatorname{ctg} i} d\xi_{ik} \prod_{j=1}^\mu \int_{-\infty}^{z_0 + j \Delta r_\varepsilon \operatorname{ctg} \varepsilon} d\xi_{\varepsilon j} W_{v+\mu} \right\}. \quad (3)$$

Функция $W_{2\infty} = \lim_{\Delta r_i, \Delta r_\varepsilon \rightarrow 0} W_{v+\mu}$ – совместная плотность вероятности распределения высот во всех точках вдоль следов лучей на поверхности. Вероятность $P(E_i \cap E_\varepsilon)$ относится к точке на поверхности с координатами (z_0, y_0, x_0) . Используя эту вероятность, можно найти среднюю вероятность $\overline{P(E_i \cap E_\varepsilon)}$, которая определяет освещенную и видимую часть площади поверхности:

$$\overline{P(E_i \cap E_\varepsilon)} = \int_{-\infty}^{\infty} dz_0 \int_M P(E_i \cap E_\varepsilon) d\xi_{0x} d\xi_{0y}, \quad (4)$$

где $\xi_{0x} = \left. \frac{\partial \xi}{\partial x} \right|_{x=x_0}$, $\xi_{0y} = \left. \frac{\partial \xi}{\partial y} \right|_{y=y_0}$, а M – область наклонов, в которой не наступает самозатенения поверхности.

Решение задачи затенения выписано в общем виде. Проблема в том, как вычислить величину $P(E_i \cap E_\varepsilon)$. Для этого используются различные приближения. Простейшим из них является предположение о том, что многоточечная плотность вероятности $W_{2\infty} = \lim_{\Delta r_i, \Delta r_\varepsilon \rightarrow 0} W_{v+\mu}$ может быть представлена как бесконечное произведение одноточечных плотностей. В этом приближении, однако, невозможно учесть скоррелированность входа и выхода (после рассеяния) лучей, а это приводит к большим ошибкам в расчете теневого эффекта.

Следующим по сложности является использование трехточечных плотностей вероятности (Шкуратов и Станкевич, 1992, Shkuratov et al., 2000). Это минимальное усложнение задачи дает возможность учитывать азимутальную зависимость условной вероятности выхода луча (при заданных параметрах падающего луча) после его рассеяния шероховатой поверхностью. В этом приближении фотометрическая функция случайной поверхности с гауссовской статистикой высот имеет следующий вид:

$$F(i, \varepsilon, \varphi) = \frac{T(i, \varepsilon, \varphi)}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{\infty} dz_0 \exp\left(-\frac{z_0^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi\sigma^2}} \left[\frac{\Lambda_\varepsilon I_\varepsilon}{\operatorname{tg} \varepsilon} + \frac{\Lambda_i I_i}{\operatorname{tg} i} \right]\right], \quad (5)$$

где

$$I_\varepsilon = \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\frac{\xi_\varepsilon^{(0)^2}}{2\sigma^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left[\frac{z_0(1-R) + r(\operatorname{ctg} i - R \operatorname{ctg} \varepsilon)}{\sigma \sqrt{2(1-R)^2}} \right] \right]}{\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\xi_i^{(0)}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\xi_\varepsilon^{(0)}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] + 4k(z_0, r)} dr, \quad (6)$$

$$I_i = \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\frac{\xi_i^{(0)^2}}{2\sigma^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left[\frac{z_0(1-R) + r(\operatorname{ctg} \varepsilon - R \operatorname{ctg} i)}{\sigma \sqrt{2(1-R)^2}} \right] \right]}{\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\xi_i^{(0)}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\xi_\varepsilon^{(0)}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] + 4k(z_0, r)} dr, \quad (7)$$

$$k(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int_0^R \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} \exp \left[\frac{a^2 + b^2 - 2tab}{2\sigma^2(1-t^2)} \right]. \quad (8)$$

$$\Lambda_i = \frac{\rho \operatorname{tgi}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\operatorname{ctgi})^2}{2\rho^2} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{\operatorname{ctgi}}{\sqrt{2\rho}} \quad (9)$$

$$\Lambda_\varepsilon = \frac{\rho \operatorname{tg}\varepsilon}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\operatorname{ctg}\varepsilon)^2}{2\rho^2} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{2\rho}} \quad (10)$$

$$R = \exp \left[-4 \left(\frac{r}{L} \right)^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right], \quad (11)$$

$$\xi_{i,\varepsilon}^{(0)} = z_0 + r \operatorname{ctg}(i, \varepsilon), \quad (12)$$

где $\operatorname{erf}(x)$ – функция ошибок, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\zeta^2} d\zeta$, $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$, а угол φ – азимутальный

угол (угол между плоскостью падения и плоскостью отражения).

Функция $T(i, \varepsilon, \varphi)$ описывает самозатенение площадки:

$$T(i, \varepsilon, \varphi) = 1 - \frac{\varphi}{2\pi} \exp \left(\frac{-t^2}{2\rho^2} \right) - \frac{1}{2\pi\rho^2} \left[\int_{t_{\min}}^{\infty} dt t \exp \left(\frac{-t^2}{2\rho^2} \right) \arccos \frac{t_{\min}}{t} + \right. \\ \left. + \int_{t_{\min}}^{t_0} dt t \exp \left(\frac{-t^2}{2\rho^2} \right) \arccos \frac{t_{\min}}{t} + \int_{t_0}^{\infty} dt t \exp \left(\frac{-t^2}{2\rho^2} \right) \arccos \frac{t_{\max}}{t} + \delta \right], \quad (13)$$

где $t_{\min} = \min\{\operatorname{ctgi}, \operatorname{ctg}\varepsilon\}$, $t_{\max} = \max\{\operatorname{ctgi}, \operatorname{ctg}\varepsilon\}$,

$$t_0 = \frac{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 i + \operatorname{ctg}^2 \varepsilon - 2 \operatorname{ctg} i \operatorname{ctg} \varepsilon \cos \varphi}}{\sin \varphi}, \quad (14)$$

$$\delta = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq \varphi \leq \arccos \left[\frac{t_{\min}}{t_{\max}} \right], \\ 2 \int_{t_{\max}}^{t_0} dt t \exp \left[-\frac{t^2}{2\rho^2} \right] \arccos \frac{t_{\max}}{t}, & \text{если } \arccos \left[\frac{t_{\min}}{t_{\max}} \right] \leq \varphi \leq \pi \end{cases}, \quad (15)$$

где $\rho = \sigma / L$ – дисперсия наклонов поверхности (L – размер области корреляции высот). Если пренебречь скоррелированностью входных и выходных траекторий лучей при взаимном затенении неровностей поверхности, то формула (5) переходит в формулу, полученную Смитом [2] для случая, когда все точки поверхности имеют независимые статистические распределения:

$$F(i, \varepsilon, \varphi) = \frac{T(i, \varepsilon, \varphi)}{1 + \Lambda_i + \Lambda_\varepsilon}. \quad (16)$$

Позднее нам удалось найти точное решение задачи затенения на случайной шероховатой поверхности с гауссовской статистикой высот (Shkuratov et al., 2003). Это стало возможным, как это ни странно, после существенного усложнения задачи.

Рассмотрим затенение на многоуровневой (иерархически организованной) поверхности. При этом условная поверхность, описывающая крупномасштабные неровности, рассматривается как референс поверхность для отсчета высот мелкомасштабных неровностей. Затем условная поверхность, описывающая эти мелкомасштабные неровности, рассматривается как референс поверхность для еще более мелких неровностей и т.д. Если

неровности всех уровней идентичны по статистическим характеристикам, то такая иерархическая структура может рассматриваться как однородный предфрактал. Будем далее считать, что каждый элементарный уровень предфрактала описывается случайной функцией с гауссовской статистикой наклонов. Для того чтобы описать рассеяние света такой поверхностью, мы использовали принцип масштабной инвариантности задач рассеяния света в приближении геометрической оптики.

Пусть $F(\mu, \overline{\theta^2}, \alpha, \beta, \gamma)$ есть функция рассеяния света предфрактальной поверхностью. Мы вводим в рассмотрение параметр $\rho \equiv \rho_\mu = \mu \overline{\theta^2}$, который характеризует угол куммулятивного наклона поверхности на самом мелкомасштабном иерархическом уровне поверхности ($\overline{\theta^2}$ – среднеквадратичный угол наклона поверхности на элементарном уровне шероховатости и μ – количество уровней предфрактала). Углы α , β и γ – фотометрические координаты (α – угол фазы, β – фотометрическая широта, отсчитываемая от экватора интенсивности, а γ – фотометрическая долгота, отсчитываемая от центрального меридиана). Углы α , β и γ связаны с традиционными фотометрическими углами i , ε и φ (угол падения, угол отражения и азимутальный угол) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \cos \varepsilon \cos i + \sin \varepsilon \sin i \cos \varphi \\ \cos \gamma &= \cos \varepsilon / \cos \beta \end{aligned} \right\} \cos \beta = \sqrt{\frac{(\sin(i + \varepsilon))^2 - \left(\cos \frac{\varphi}{2}\right)^2 \sin 2\varepsilon \sin 2i}{(\sin(i + \varepsilon))^2 - \left(\cos \frac{\varphi}{2}\right)^2 \sin 2\varepsilon \sin 2i + (\sin \varepsilon)^2 (\sin i)^2 (\sin \varphi)^2}} \quad (17)$$

и

$$\left. \begin{aligned} \cos i &= \cos \beta \cos(\gamma - \alpha) \\ \cos \varepsilon &= \cos \beta \cos \gamma \\ \cos \varphi &= \frac{\cos \alpha - \cos i \cos \varepsilon}{\sin i \sin \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Углы i и ε отсчитываются от глобальной нормали к референс плоскости самого крупномасштабного уровня предфрактала.

Перемасштабируем рассматриваемый предфрактал, мысленно убирая самый мелкомасштабный уровень шероховатости, но добавляя новый уровень со стороны крупных масштабов. В этом случае, первый шаг означает, что $F(\rho_{\mu+1}, \overline{\theta^2}, \alpha, \beta, \gamma) \rightarrow F(\rho_\mu, \overline{\theta^2}, \alpha, \beta, \gamma)$.

Второй шаг дает $\frac{1}{S_0} \iint_{S_0} F[\rho_\mu, \overline{\theta^2}, \alpha, \tilde{\beta}(x, y), \tilde{\gamma}(x, y)] \frac{dx dy}{\cos \theta(x, y)} \rightarrow F_{new}(\rho_\mu, \overline{\theta^2}, \alpha, \beta, \gamma)$, где x , y –

декартовы координаты на референс плоскости; S_0 – площадь усреднения в референс плоскости; θ – угол между глобальной нормалью к референс плоскости и локальной нормалью поверхности; $\tilde{\gamma}$ и $\tilde{\beta}$ – фотометрические координаты, усредненные по θ .

Величины $\tilde{\gamma}(x, y)$ и $\tilde{\beta}(x, y)$ варьируются вблизи γ и β . Множитель $\frac{1}{\cos \theta(x, y)}$ учитывает увеличение площади поверхности из-за введения дополнительной шероховатости со стороны крупных масштабов. Используя масштабную инвариантность задачи, имеем:

$$F(\rho_{\mu+1}, \overline{\theta^2}, \alpha, \gamma, \beta) = \frac{1}{S_0} \iint_{S_0} F[\rho_\mu, \overline{\theta^2}, \alpha, \tilde{\beta}(x, y), \tilde{\gamma}(x, y)] \frac{dx dy}{\cos \theta(x, y)}. \quad (19)$$

Это интегральное уравнение позволяет получить функцию рассеяния предфрактала.

Это уравнение может быть заменено следующим эквивалентным дифференциальным уравнением (Shkuratov et al., 2003):

$$\sum_{p=1}^{\infty} \frac{\partial^p F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \gamma)}{\partial \rho^p} \frac{(\bar{\theta}^2)^{p-1}}{p!} = \sum_{p=1}^{\infty} \left\{ \sum_{k=0}^{p-1} \left[C_p^k \left(\sum_{l=p-k}^p \frac{(2l-1)!!}{2^l l!} \right) \Delta^{p-k} \right] + (-1)^{p+1} \right\} \frac{(\bar{\theta}^2)^{p-1}}{(2p)!} F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \gamma) \quad (20)$$

с соответствующими начальными

$$F(0, 0, \alpha, \beta, \gamma) = \chi(\alpha, \beta, \gamma) \quad (21)$$

и граничными

$$F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \pi/2) = F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \alpha - \pi/2) = F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \pm \pi/2, \gamma) = 0 \quad (22)$$

условиями, где Δ – оператор Лапласа в координатах γ и β , C_p^k – биномиальные коэффициенты. Функция $\chi(\alpha, \beta, \gamma)$ – индикатриса рассеяния элементами поверхности на самом мелком масштабе предфрактальной поверхности. Граничные условия показывают, что рассеянный поток от лимба и терминатора равен нулю. Используются также условия симметрии (т.е. принцип взаимности):

$$F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \gamma) = F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, -\beta, \gamma), \quad (23)$$

$$F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \gamma) = F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \alpha - \gamma). \quad (24)$$

Отметим, что при стремлении $\bar{\theta}^2$ к нулю уравнение (19) приводится к виду

$$\frac{\partial F(\rho, \alpha, \beta, \gamma)}{\partial \rho} = \frac{1}{4}(\Delta + 2)F(\rho, \alpha, \beta, \gamma). \quad (25)$$

Решение уравнения (20) методом Фурье дает:

$$F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \beta, \gamma) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} E_{nm}(\alpha) \left[\sum_{p=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{p-1} C_p^k \sum_{l=p-k}^p \frac{(2l-1)!!}{2^l l!} (-C_{nm}(\alpha))^{p-k} + (-1)^{p+1} \right] \frac{(\bar{\theta}^2)^{p-1}}{(2p)!} \quad (26)$$

$$\cos \gamma \cos \beta - \frac{\alpha}{2} \sin \beta \quad {}_2F_1 \left(n + k_m + \frac{1}{2}, -n; \frac{1}{2}; (\sin \beta)^2 \right) \sin \beta$$

где ${}_2F_1 \left(n + k_m + \frac{1}{2}, -n; \frac{1}{2}; (\sin \beta)^2 \right)$ – так называемые гипергеометрические полиномы,

$$k_m(\alpha) = \frac{\pi}{\pi - \alpha} (2m + 1), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (27)$$

$$C(\alpha) \equiv C_{nm}(\alpha) = \left[k_m(\alpha) + \frac{1}{2} + 2n \right]^2 - \frac{1}{4}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (28)$$

$\mu = \rho/\bar{\theta}^2$. Коэффициенты $E_{nm}(\alpha)$ находятся из начальных условий:

$$E_{nm}(\alpha) = \frac{1}{M_{mn}(\alpha)} \int_{\alpha-\pi/2}^{\pi/2} d\gamma \int_0^{\pi/2} d\beta (\cos \beta)^{k_m+1} \cos \left[k_m \left(\gamma - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \chi(\alpha, \beta, \gamma) {}_2F_1 \left(n + k_m + \frac{1}{2}, -n; \frac{1}{2}; (\sin \beta)^2 \right), \quad (29)$$

где

$$M_{nm}(\alpha) = \frac{\pi^2 \pi! (2m+1) \Gamma(k_m + n + 1)}{(2k_m + 4\pi + 1) \Gamma\left(\frac{1}{2} + n\right) \Gamma\left(k_m + \frac{1}{2} + n\right) k_m}. \quad (30)$$

В некоторых случаях коэффициенты $E_{nm}(\alpha)$ могут быть вычислены в явном виде, например, когда $\chi(\alpha, \beta, \gamma)$ является законом Ламберта или законом Ломмеля-Зеелигера.

Для уравнения (25) с теми же начальными и граничными условиями имеем следующее решение (Шкуратов, 1995):

$$F(\rho, \alpha, \beta, \gamma) =$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} E_{nm}(\alpha) \exp\left(-\frac{\rho}{4}(C_{mn}(\alpha) - 2)\right) \cos\left[k_m\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right)\right] (\cos\beta)^{k_m} {}_2F_1\left(n + k_m + \frac{1}{2}, -n; \frac{1}{2}; (\sin\beta)^2\right). \quad (31)$$

При больших ρ эта формула переходит в формулу, найденную Акимовым (1975, 1988):

$$F(\alpha, \beta, \gamma) \propto \cos\left[k_0\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right)\right] (\cos\beta)^{k_0}. \quad (32)$$

Хотя эта формула отвечает предельному случаю ($\rho \rightarrow \infty$, $\bar{\theta}^2 \rightarrow 0$), она хорошо описывает распределение яркости по диску Луны и других, достаточно темных, безатмосферных небесных тел.

Интересен случай, когда иерархическая поверхность создается генерациями шероховатостей, описывающихся однозначной случайной функцией с гауссовской статистикой. Тогда каждая такая генерация характеризуется не углом $\bar{\theta}^2$, а величиной $(\text{tg}\bar{\theta})^2$; фотометрическая функция такой поверхности имеет следующий вид:

$$F(\rho, \bar{\theta}^2, \alpha, \gamma, \beta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} E_{nm}(\alpha) \cos\left[k_m\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right)\right] (\cos\beta)^{k_m} {}_2F_1\left(n + k_m + \frac{1}{2}, -n; \frac{1}{2}; (\sin\beta)^2\right) \times$$

$$\times \left(1 + \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\left[\frac{p}{2}\right]} \left[\sum_{k=0}^{r-1} \left[C_r^k \left(\sum_{l=r-k}^r \frac{(2l-1)!!}{2^l l!} \right) (-C_{nm}(\alpha))^{r-k} \right] + (-1)^{r+1} \sum_{k=1}^{2\min(r, p-r+1)} \frac{\partial^{p-2r} [(\cos\theta)^{2k}]}{\partial \theta^{p-2r}} \Big|_{\theta=0} \right] \frac{(\text{tg}\bar{\theta})^{2p}}{(2p)!} \right)^{\mu}. \quad (33)$$

Если принять, что число иерархических уровней μ равно 1 (обычная случайно-неровная поверхность с гауссовской статистикой), то это решение можно сравнить с тем, что дают формулы (5) и (16). При сравнении, результаты которого даны на рис. 2.6.5, мы добавили данные о численном моделировании рассеяния света на статистически неровной поверхности с теми же значениями параметров (компьютерный эксперимент). Как и следовало ожидать, наилучшее совпадение с «экспериментальными» данными дает формула (33), поскольку она получена строго, без каких-либо упрощающих предположений. Таким образом, харьковскими астрономами была строго решена задача затенения для иерархических статистически неровных поверхностей с гауссовской статистикой наклонов поверхности. Эта задача существенно выходит за рамки астрономических исследований; полученное решение может быть полезно в задачах локации морской поверхности и земных ландшафтов.

Расчеты затенений для иерархической топографии представляют интерес в связи с оценкой площади лунной поверхности, находящейся в областях вечной тени. Такие области имеются вблизи лунных полюсов. В них могут накапливаться летучие и водяной лед, поскольку температура поверхности здесь низка. Как показано в работе (Петров и др., 2003), наличие иерархической структуры может в несколько раз увеличить оценки площади постоянно затененных областей.

Рассеяние света случайными средами

Планетные реголиты являются примерами случайных сред, состоящих из частиц разного размера, преимущественно много большими длины световой волны. Как уже отмечалось, фотометрические свойства таких сред определяются: индикатрисой рассеяния «ти-

пичной» частицы, теньвым эффектом в среде, многократным (когерентным и некогерентным) рассеянием в среде. Рассеяние света изолированными частицами будет рассмотрено ниже. Здесь же мы сосредоточимся на исследовании теневого эффекта и эффекта когерентного усиления обратного рассеяния.

Теневой эффект. Этот эффект наиболее важный для формирования фотометрических характеристик реголитоподобных поверхностей. Даже в случае светлых поверхностей он играет большую роль. Теневой эффект для сред, состоящих из крупных частиц, исследовался как аналитическими методами, так и с помощью компьютерного моделирования. Среди аналитических результатов отметим простую формулу для теневого фотометрической функции, полученную в работах (Шкуратов, 1988, Шкуратов и др., 1991).

$$F_T(\alpha, \gamma, \beta) = \cos \beta \cos \gamma \cos(\alpha - \gamma) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\cos \gamma + \cos(\alpha - \gamma))^n}{\prod_{m=0}^n \left(\cos \gamma + \cos(\alpha - \gamma) - m \frac{2}{3} \ln(1 - \xi) \sin \alpha \right)}, \quad (34)$$

где α , γ и β – как и ранее фазовый угол, фотометрическая долгота и широта, соответственно ξ – число частиц в объеме, равном объему одной частицы; это характеристика плотности упаковки среды. Эта формула получена для статистически однородной среды в предположении скоррелированности входа и выхода лучей при их распространении в среде. Последнее предполагает, что если луч прошел некоторое расстояние в среде без рассеяния, то он пройдет это же расстояние в строго обратном направлении так же без рассеяния.

Теневой эффект может быть описан аналитически у сред с градиентом плотности упаковки частиц. Этот случай важен для практики, поскольку любые порошкообразные (в частности, планетные) поверхности имеют переходной слой, в котором вероятность встретить частицу среды убывает от нижней границы к верхней постепенно. Толщина такого слоя обычно составляет несколько диаметров частиц. Этот слой важен, поскольку он, будучи самым внешним, вносит наибольший вклад в формирование фотометрических свойств поверхности. Особенно этот вклад велик для темных поверхностей, где многократное рассеяние развито слабо. Аналитическое рассмотрение градиентных сред может быть основано на использовании результатов, полученных при расчете затенений статистически неровных поверхностей, которые описываются однозначной случайной функцией (Шкуратов и Станкевич, 1992, Петров и Шкуратов, 2006). Пусть имеется такая поверхность. Рассечем ее наклонной плоскостью (см. рис. 2.6.6). В сечении на этой плоскости возникнет двумерная среда с градиентом плотности. В верхней ее части видны частицы случайной формы, а в нижней части возникает неоднозначный рельеф. Если наклон плоскости сечения по отношению к средней плоскости поверхности равен нулю, то возникает статистически однородная двумерная среда, чья плотность регулируется высотой плоскости сечения над средним уровнем. То, что это среда только двумерная, не имеет значения, поскольку задача однократного рассеяния сама по себе является двумерной. Формулы, позволяющие связать геометрию светорассеяния в двумерной среде с геометрией светорассеяния на трехмерной поверхности, нетрудно получить, пользуясь рис. 2.6.6:

$$\begin{aligned} \cos i &= \cos \psi \cos i_0 \\ \cos \varepsilon &= \cos \psi \cos \varepsilon_0 \\ \cos \varphi &= \frac{\cos \alpha - \cos^2 \psi \cos i_0 \cos \varepsilon_0}{\sqrt{(1 - \cos^2 \psi \cos^2 i_0)(1 - \cos^2 \psi \cos^2 \varepsilon_0)}} \end{aligned} \quad (35)$$

Здесь угол ψ задает наклон плоскости сечения трехмерного рельефа; этот угол можно рассматривать как параметр двумерной градиентной среды. Если подставить выражения (35) в формулу (5), то получим возможность рассчитать теневую фотометрическую функцию градиентных сред в приближении трехточечной плотности вероятности. Если выражения (35) подставляются сначала в формулу (17), а затем (33), то можно рассчитать теневую функцию градиентных сред с предфрактальной структурой частиц поверхности этих сред, причем эта функция будет отвечать строгому решению задачи.

Применение аналитических методов к описанию теневого эффекта и многократного рассеяния носит ограниченный характер. Для получения точных результатов весьма

продуктивным оказывается метод компьютерного трассирования лучей в среде. В НИИ астрономии было выполнено множество работ, посвященных использованию такого трассирования (например, Stankevich et al., 2000, 2002). Большую работу для становления этого направления выполнил к.ф.-м.н. Станкевич Д. Г., который на протяжении более чем 15 лет разрабатывал основные алгоритмы компьютерного моделирования светорассеяния.

Задача такого моделирования распадается на два этапа. Первый – это генерирование среды в памяти компьютера, а второй – собственно трассирование лучей. Для генерирования среды рассматривается кубический объем, который заполняется частицами случайным образом. Для исследования теневого эффекта и многократного рассеяния в средах в приближении геометрической оптики достаточно использовать сферические непрозрачные частицы с заданной индикатрисой рассеяния элемента поверхности (это может быть, например, ламбертовская индикатриса). Максимальная плотность среды, которая генерируется случайным заполнением одинаковых сферических частиц без их пересечений, может достигать 0,37. Если частицы имеют разный размер, то эта цифра может быть приближена к 0,5, что близко к плотности планетных реголитов. После заполнения кубического объема на его верхнюю грань под заданным углом к нормали к поверхности бросается большое количество лучей, это могут быть многие миллионы лучей. Рабочий объем циклически замыкается. Это означает, что если луч в процессе распространения или многократного рассеяния в среде выходит через боковые стороны куба или его днище, то считается, что он вновь входит в тот же рабочий объем через противоположную сторону. Так с помощью конечного объема имитируется полубесконечная среда. Луч трассируется до тех пор, пока он не выйдет из среды (через верхнюю грань куба), либо пока его вклад не станет пренебрежимо малым. На рис. 2.6.7 показана теневая фазовая функция для разных плотностей среды ρ (отношение объема, занятого веществом, к общему объему). Как видно, уменьшение плотности приводит к более узкому оппозиционному пику, при этом увеличивается его нелинейность.

Эффект когерентного усиления обратного рассеяния. Суть этого эффекта поясняет рис. 2.6.4. Использование этого эффекта для объяснения оппозиционного пика яркости и отрицательной поляризации было предложено в работе (Шкуратов, 1985). В дальнейшем этот подход получил большое развитие. Отметим попытку аналитически решить задачу описания фотометрического и поляриметрического оппозиционных эффектов в приближении двукратного рассеяния (Шкуратов, 1991, Shkuratov et al., 1994). Была получена следующая формула для описания ветви отрицательной поляризации для сред, состоящих из частиц, чья индикатриса описывается обобщенным законом Релея.

$$P = G \frac{(1 + 2\sqrt{1 - \omega})^2}{9} \left\{ \frac{\sin^2 \alpha}{1 + \cos^2 \alpha} + \frac{2\omega \xi \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{8}{5} \rho \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2} \right]^2}{\left(\frac{8}{5} \rho \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2 \sqrt{1 + \left(\frac{8}{5} \rho \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2} \ln(1 - \xi)} \right\}, \quad (36)$$

где α – угол фазы, ω – альбеда однократного рассеяния одиночной частицы, ξ – количество частиц в объеме, равном объему одной частицы, G – множитель в обобщенной релеевской поляриметрической индикатрисе: $P = G \frac{\sin^2 \alpha}{1 + \cos^2 \alpha}$, $\rho = -\frac{8\pi}{3} \frac{r}{\lambda} \frac{1}{\ln(1 - \xi)}$, причем r и λ – радиус рассеивателей и длина волны, соответственно.

Позднее, с помощью численного моделирования многократного рассеяния света в среде с заданной матрицей рассеяния одиночных частиц было показано, что кратности рассеяния выше второй могут вносить заметный вклад в формирование ветви отрицательной поляризации (Shkuratov et al., 2002). Недавно работы по численному моделированию когерентного усиления обратного рассеяния были возобновлены. Рассматривались среды, состоящие из непрозрачных сферических частиц с зеркальной поверхностью (Stankevich et al., 2006). В частности, было показано, что в разность фаз прямых и обратных траекторий может вноситься дополнительная сдвигка за счет смещения точек отражения лучей зеркальной поверхностью частиц при изменении фазового угла. Отметим также работу (Шкуратов,

1991), в которой впервые обращалось внимание на необходимость учета углового размера источника света (Солнца) при интерпретации оппозиционных пиков когерентного усиления обратного рассеяния.

Особый интерес вызывают методы описания характеристик рассеяния света кластерами (агрегатами) частиц. Интерес этот связан с тем, что для кластеров, состоящих даже из нескольких частиц, важную роль играют эффекты многократного рассеяния. Изучая эти эффекты, можно понять природу и условия возникновения их для сред типа реголита на поверхностях безатмосферных небесных тел. В работе (Tishkovets et al., 2004) было показано, что хаотически ориентированные кластеры сферических частиц, сравнимых с длиной волны, могут показывать яркостной и поляризационный оппозиционные эффекты.

Рассеяние света одиночными несферическими частицами

Слабые отклонения от сферичности. Исследования рассеяния света несферическими частицами началось в Харьковской обсерватории в конце 70-х годов прошлого века с работ В. П. Тишкова и Ю. В. Александрова, в которых рассматривался случай малых отклонений формы сферических частиц от идеальной (Александров и Тишковец, 1979, 1980, 1983). Форма частицы задается в виде $r = a(1 + \varepsilon f(\theta, \varphi))$, где a – радиус сферы, ε – малый параметр, $f(\theta, \varphi)$ – произвольная непрерывная функция, θ и φ – угловые координаты сферической системы; поле, рассеянное частицей, ищется в виде $\vec{E} = \vec{E}_0 + \varepsilon \vec{E}_1 + \varepsilon^2 \vec{E}_2$. Такая задача рассматривалась и до работ (Александров и Тишковец, 1979, 1980, 1983), однако решение, полученное харьковскими астрономами, было более общим. Это решение представляет интерес и сейчас, например, для исследования устойчивости таких специфических эффектов сферических частиц, как радуга и gloria, при воздействии малых возмущений. Свет, рассеянный несферическими частицами, частично деполяризуется, если падающее излучение поляризовано.

Развитие дискрет-дипольного приближения. После работ (Александров и Тишковец, 1979, 1980, 1983) в НИИ астрономии в исследованиях свойств рассеяния света несферическими частицами был почти двадцатилетний перерыв. Только в 1999 году были опубликованы первые результаты применения метода дискрет-дипольного приближения (ДДП), который позволяет анализировать оптические свойства частиц случайной формы (Зубко и др., 1999). Рассмотрим подробнее метод ДДП. Пусть на произвольную частицу, занимающую область пространства V , падает плоская монохроматическая электромагнитная волна с частотой ω . Заменим исследуемую частицу дискретной системой достаточно малых по сравнению с длиной волны субчастиц (диполей), расположив их в узлах кубической решетки, равномерно заполняющей объем. Размер субчастицы примем равным размеру кубической ячейки. Поле, создаваемое частицей на бесконечном удалении, есть сумма полей, создаваемых субчастицами. Каждая субчастица взаимодействует с полем, падающим от источника, и полем, наведенным остальными субчастицами. Для того чтобы найти наведенное поле, воспользуемся известным выражением, которое задает электрическую напряженность поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, рассеянного некоторым объемом V (частицей):

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = (\text{grad div} + k^2) \frac{1}{4\pi} \int_V (\varepsilon(\mathbf{r}') - 1) \mathbf{E}(\mathbf{r}') \frac{\exp(ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r}', \quad (37)$$

где $\mathbf{r}$ – вектор, задающий точку наблюдения; $\mathbf{r}'$ – вектор, задающий точку внутри объема; $\mathbf{E}(\mathbf{r}')$ – поле внутри объема; $\varepsilon(\mathbf{r}')$ – диэлектрическая проницаемость вещества частицы; $k = \omega/c$ – волновое число. Формулу (37) можно несколько преобразовать и рассматривать формально как интегральное уравнение для поля, наведенного всеми субчастицами на данной субчастице. В дискретном представлении это уравнение переходит в систему линейных алгебраических уравнений:

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_i^{\text{inc}} + \sum_{j \neq i} \frac{\exp(ikr_{ij})}{r_{ij}^3} \beta_j \left[k^2 ((\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{E}_j) \times \mathbf{r}_{ij}) + \frac{1 - ikr_{ij}}{r_{ij}^2} (3\mathbf{r}_{ij}(\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{E}_j) - r_{ij}^2 \mathbf{E}_j) \right], \quad (38)$$

где β_j – поляризуемость j -ого диполя, которая может быть задана разными способами, в том числе и с помощью известной формулы Клаузиуса-Моссотти; $\mathbf{E}_i^{\text{inc}}$ – падающее поле на i -ом диполе; $\mathbf{E}_j$ – полное поле, наведенное на j -ом диполе; $\mathbf{r}_{ij}$ – вектор, соединяющий i -ый и j -ый диполи, $r_{ij} = |\mathbf{r}_{ij}|$. Когда электрическая напряженность полного поля $\mathbf{E}_i$ найдена, становится возможным определение рассеянного поля вдали от частицы. Затем может быть определена матрица рассеяния частицы и проведено усреднение оптических характеристик частицы по ансамблю случайно ориентированных независимо рассеивающих частиц. Метод ДДП хорош тем, что не имеет ограничений на форму частиц. Он позволяет рассматривать также частицы, неоднородные по составу, и даже кластеры частиц случайной формы. Существует лишь единственная проблема – это компьютерное время. Для частиц с размерным параметром $X = 2\pi r/\lambda$ (где r – радиус описанной сферы, а λ , как и ранее, – длина волны) большим, чем 30, это время слишком велико для работы на современных компьютерах.

Для выполнения длительных ДДП вычислений в НИИ астрономии создан кластер из 10 РС IBM, который позволяет проводить параллельные расчеты. Сотрудником нашего НИИ Зубко Е. С. была создана программа, более эффективная, чем существующие. Она позволяет выполнять множество различных исследований, включая исследования механизмов возникновения отрицательной поляризации света малых частиц случайной формы (Zubko et al., 2005, 2006). На рис. 2.6.8 приведен пример таких расчетов. Здесь показана зависимость степени поляризации, вычисленная для агрегатных частиц (см. вставку) с действительной частью показателя преломления 1.5 и $X = 10$. Кривые 1-4 отвечают мнимой части коэффициента преломления $\text{Im}(m) = 0, 0,02, 0,05$ и $0,1$, соответственно. Из этого рисунка следует, что глубина отрицательной ветви поляризации частиц неправильной (агрегатной) формы, размером порядка длины волны, максимальна для слабо поглощающих частиц. При этом величина максимума положительной поляризации минимальна.

Развитие метода T -матрицы. Несколько лет назад у нас начались исследования рассеивающих свойств частиц так называемым методом T -матрицы. Метод T -матрицы использует разложение падающего и рассеянного полей по сферическим векторным функциям:

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [a_{mn} \mathbf{RgM}_{mn}(r, \theta, \varphi) + b_{mn} \mathbf{RgN}_{mn}(r, \theta, \varphi)], \quad (39)$$

$$\mathbf{E}^{\text{sca}}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [p_{mn} \mathbf{M}_{mn}(r, \theta, \varphi) + q_{mn} \mathbf{N}_{mn}(r, \theta, \varphi)], \quad (40)$$

где $\mathbf{RgM}_{mn}(r, \theta, \varphi)$, $\mathbf{RgN}_{mn}(r, \theta, \varphi)$, $\mathbf{M}_{mn}(r, \theta, \varphi)$, $\mathbf{N}_{mn}(r, \theta, \varphi)$ и a_{mn} , b_{mn} , p_{mn} , q_{mn} – соответственно векторные сферические функции и коэффициенты разложения. В силу линейности уравнений Максвелла коэффициенты разложения рассеянного поля p_{mn} , q_{mn} могут быть выражены через коэффициенты разложения падающего поля a_{mn} , b_{mn} :

$$p_{mn} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} [T_{mnm'n'}^{11} a_{m'n'} + T_{mnm'n'}^{12} b_{m'n'}] \quad (41)$$

и

$$q_{mn} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} [T_{mnm'n'}^{21} a_{m'n'} + T_{mnm'n'}^{22} b_{m'n'}]. \quad (42)$$

Матрица

$$T_{mnm'n'} = \begin{pmatrix} T_{mnm'n'}^{11} & T_{mnm'n'}^{12} \\ T_{mnm'n'}^{21} & T_{mnm'n'}^{22} \end{pmatrix} \quad (43)$$

называется T -матрицей. Фундаментальным свойством T -матрицы является то, что ее элементы зависят только от физических (размерный параметр, показатель преломления), геометрических (форма) характеристик рассеивающего объекта и его ориентации в прост-

ранстве; T -матрица не зависит от геометрии светорассеяния и поляризации падающего излучения. Это означает, что, будучи найдена один раз, она может быть использована для вычислений рассеянного поля для любой геометрии светорассеяния. Можно показать [3], что T -матрица может быть вычислена с помощью следующих соотношений:

$$\mathbf{T}_{mnm'n'} = -(\text{Rg}\mathbf{Q}_{mnm'n'}) (\mathbf{Q}_{mnm'n'})^{-1}, \quad (44)$$

где матрицы $\text{Rg}\mathbf{Q}_{mnm'n'}$ и $\mathbf{Q}_{mnm'n'}$ задаются следующими выражениями:

$$\text{Rg}\mathbf{Q}_{mnm'n'} = \begin{pmatrix} \text{Rg}Q_{mnm'n'}^{11} & \text{Rg}Q_{mnm'n'}^{12} \\ \text{Rg}Q_{mnm'n'}^{21} & \text{Rg}Q_{mnm'n'}^{22} \end{pmatrix}, \quad (45)$$

$$\mathbf{Q}_{mnm'n'} = \begin{pmatrix} Q_{mnm'n'}^{11} & Q_{mnm'n'}^{12} \\ Q_{mnm'n'}^{21} & Q_{mnm'n'}^{22} \end{pmatrix}, \quad (46)$$

причем

$$Q_{mnm'n'}^{11} = -i(m_0 J_{mnm'n'}^{21} + J_{mnm'n'}^{12}), \quad (47)$$

$$Q_{mnm'n'}^{12} = -i(m_0 J_{mnm'n'}^{11} + J_{mnm'n'}^{22}), \quad (48)$$

$$Q_{mnm'n'}^{21} = -i(m_0 J_{mnm'n'}^{22} + J_{mnm'n'}^{11}), \quad (49)$$

$$Q_{mnm'n'}^{22} = -i(m_0 J_{mnm'n'}^{12} + J_{mnm'n'}^{21}), \quad (50)$$

$$\text{Rg}Q_{mnm'n'}^{11} = -i(m_0 \text{Rg}J_{mnm'n'}^{21} + \text{Rg}J_{mnm'n'}^{12}), \quad (51)$$

$$\text{Rg}Q_{mnm'n'}^{12} = -i(m_0 \text{Rg}J_{mnm'n'}^{11} + \text{Rg}J_{mnm'n'}^{22}), \quad (52)$$

$$\text{Rg}Q_{mnm'n'}^{21} = -i(m_0 \text{Rg}J_{mnm'n'}^{22} + \text{Rg}J_{mnm'n'}^{11}), \quad (53)$$

$$\text{Rg}Q_{mnm'n'}^{22} = -i(m_0 \text{Rg}J_{mnm'n'}^{12} + \text{Rg}J_{mnm'n'}^{21}), \quad (54)$$

где

$$\begin{bmatrix} J_{mnm'n'}^{11} \\ J_{mnm'n'}^{12} \\ J_{mnm'n'}^{21} \\ J_{mnm'n'}^{22} \end{bmatrix} = (-1)^m \iint_S dS \mathbf{n}(r, \theta, \varphi) \cdot \begin{bmatrix} \text{Rg}\mathbf{M}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{M}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \text{Rg}\mathbf{M}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{N}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \text{Rg}\mathbf{N}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{M}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \text{Rg}\mathbf{N}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{N}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \end{bmatrix}, \quad (55)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Rg}J_{mnm'n'}^{11} \\ \text{Rg}J_{mnm'n'}^{12} \\ \text{Rg}J_{mnm'n'}^{21} \\ \text{Rg}J_{mnm'n'}^{22} \end{bmatrix} = (-1)^m \iint_S dS \mathbf{n}(r, \theta, \varphi) \cdot \begin{bmatrix} \text{Rg}\mathbf{M}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \text{Rg}\mathbf{M}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \text{Rg}\mathbf{M}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \text{Rg}\mathbf{N}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \text{Rg}\mathbf{N}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \text{Rg}\mathbf{M}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \text{Rg}\mathbf{N}_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \text{Rg}\mathbf{N}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \end{bmatrix}. \quad (56)$$

Таким образом, нахождение элементов T -матрицы представляет собой сложную задачу. В общем случае эта задача сводится к необходимости численного расчета поверхностного интеграла от весьма громоздкой функции (см. формулы (55) и (56)). Оказалось, однако, что этот интеграл может быть преобразован так, что влияние формы, с одной стороны, и влияние размера частиц, а также их коэффициента преломления, с другой стороны, факторизуется. Эта модификация метода T -матриц была предложена в работе (Petrov et al., 2006). Эта модификация основана на введении так называемых Sh -матриц. Элементы Sh -матриц зависят только от формы частицы и не зависят от ее размера или оптических констант. Это позволяет вычислить Sh -матрицы только один раз и затем найти элементы T -матрицы для любых размеров и показателей преломления частиц. Например, выражение для $\text{Rg}J_{mnm'n'}^{11}$ выглядит следующим образом:

$$\text{Rg}J_{mm'n'}^{11}(X, m_0) = X^{n+n'+2} (m_0)^{n'} \sum_{k_1=0}^{\infty} \frac{(Xm_0)^{2k_1}}{k_1! \Gamma\left(n' + k_1 + \frac{3}{2}\right)} \sum_{k_2=0}^{\infty} \frac{(X)^{2k_2}}{k_2! \Gamma\left(n + k_2 + \frac{3}{2}\right)} \text{Rg}Sh_{mm'n', k_1+k_2}^{11}, \quad (57)$$

где $\text{Rg}Sh^{11}$ – один из элементов матрицы формы:

$$\text{Rg}Sh_{mm'n', k}^{11} = -i\pi \frac{(-1)^{m'-m+k}}{2^{2k+n'+n+2}} A_{nn'} \int_0^\pi d\theta \left\{ \sin \theta \left[\pi_{m'n'}(\theta) \tau_{mn}(\theta) + \pi_{mn}(\theta) \tau_{m'n'}(\theta) \right] \int_0^{2\pi} d\varphi \exp[i\varphi(m'-m)] (R_0)^{2k+n+n'+2} \right\}, \quad (58)$$

где $R_0 = \frac{R(\theta, \varphi)}{X}$, $X = 2\pi r/\lambda$, как и ранее, – размерный параметр. Как видно, Sh -матрицы зависят от двойного интеграла, взятого по поверхности частицы. Его вычисление с нужной точностью – задача непростая. Однако для частиц некоторых форм интегралы все же могут быть найдены аналитически. В частности, для вытянутого сфероида с осями a и b (все размеры выражены в единицах размерного параметра, $b \leq a$) элемент $\text{Rg}Sh^{11}$ описывается следующим соотношением:

$$\text{Rg}Sh_{mm'n', k}^{11} = -i\pi^2 \frac{(-1)^{m'-m+k}}{2^{2k+n'+n+1}} A_{nn'} \delta_{mm'} b^{2k+n+n'+2} I_{mm'n'}^{(1)} \left(k + \frac{n+n'+2}{2} \right), \quad (59)$$

где

$$I_{mm'n'}^{(1)}(z) = m \left[\frac{n' \sqrt{(n'+1)^2 - m'^2}}{2n'+1} I_{mm'n'+1}^{(\theta)}(z) - \frac{(n'+1) \sqrt{n'^2 - m'^2}}{2n'+1} I_{mm'n'-1}^{(\theta)}(z) \right] + \\ + m' \left[\frac{n \sqrt{(n+1)^2 - m^2}}{2n+1} I_{mn+1m'n'}^{(\theta)}(z) - \frac{(n+1) \sqrt{n^2 - m^2}}{2n+1} I_{mn-1m'n'}^{(\theta)}(z) \right], \quad (60)$$

$$I_{mm'n'}^{(\theta)}(z) = (-1)^{n+n'} \Xi_m \Xi_{m'} n! \sqrt{(n-|m|)! (n+|m|)!} n'! \sqrt{(n'-|m'|)! (n'+|m'|)!} \times \\ \sum_{k=0}^{n-|m|} \frac{(-1)^k}{k! (n-k)! (n-|m|-k)! (|m|+k)!} \sum_{k'=0}^{n'-|m'|} \frac{(-1)^{k'}}{k'! (n'-k')! (n'-|m'|-k')! (|m'|+k')!} \times \\ \sum_{k''=0}^{\infty} \frac{\Gamma(z+k'') \varepsilon^{2k''}}{\Gamma(z) \Gamma(k''+1)} \sum_{k'''=0}^{k''} C_{k''}^{k''} (-4)^{k''} I(2n-2k-|m|+2n'-2k'-|m'|-1+2k'', 2k+|m|+2k'+|m'|-1+2k'''), \quad (61)$$

$$I(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\beta+1}{2}\right)}{2\Gamma\left(\frac{\alpha+\beta}{2}+1\right)}. \quad (62)$$

Аналогично получаются выражения и для других элементов Sh -матрицы.

Предложенная харьковскими астрономами модификация метода T -матрицы представляется очень перспективной, поскольку может дать решения задачи рассеяния в аналитическом виде для частиц многих форм: сфероидов (вытянутых и сплюснутых), частиц Чебышева, конечных цилиндров, капсул, бисфер и т.п.

Если полупрозрачная частица достаточно крупная, то для расчетов ее рассеивающих свойств можно использовать приближение геометрической оптики, применяя компьютерную трассировку лучей. Такое направление развивалось в работах Е. С. Гринько (Grynko and Shkuratov, 2003). В частности, были проведены расчеты для сфер, ограниченных заданным количеством треугольных микроплощадок, кубиков, в том числе деформированных, и частиц неправильной формы, также сформированных набором треугольных микроплощадок. Неправильные частицы характеризуются среднеквадратичным углом отклонения микроплощадок от описанной сферы, β . Примеры изображений таких частиц приведены на рис. 2.6.9.

На рис. 2.6.10 приведены расчеты интенсивности F_{11} и еще двух нормированных элементов матрицы рассеяния, F_{21}/F_{11} и F_{34}/F_{11} как функции угла рассеяния. Первое отношение характеризует степень линейной поляризации рассеянного света при освещении частицы неполяризованным светом, $P = F_{12}/F_{11}$. Обращает внимание то, что при больших углах рассеяния (малых фазовых углах) у частиц сложной формы отрицательной поляризации не наблюдается.

Одномерная модель многократного рассеяния в порошкообразных средах

Как уже отмечалось, спектрофотометрические свойства порошкообразных поверхностей (сред), состоящих из достаточно крупных частиц, можно анализировать в рамках приближения геометрической оптики. Для расчетов обычно используют классическую теорию переноса излучения. Строго говоря, эта теория применима только к разреженным средам, поскольку индикатрису однократного рассеяния света в среде отождествляют с индикатрисой изолированной частицы, которая соответствует освещению и наблюдению частицы из бесконечности. При переходе к конечным расстояниям, сравнимым с размером частицы (случай рассеяния в плотной среде), индикатриса частицы изменяется даже в геометрооптическом приближении (Гринько и Шкуратов, 2002).

Первой теорией переноса, в которой изначально имеют дело с параметрами частиц, а не среды, является модель стопы. Эта модель одномерна. В ней рассеяние света порошкообразной средой моделируется многократными отражениями в стопе полупрозрачных пластин с толщиной, равной среднему размеру частиц порошка. Формулы для расчета коэффициента отражения и пропускания для стопы плоскопараллельных пластин при условии нормального падения света на стопу были получены в начале прошлого столетия Стоксом [4]. При этом для оценки отражения и пропускания на границах раздела использовались коэффициенты Френеля. В 50-х годах было также показано [4], что формулы Стокса для бесконечно толстой стопы применимы для описания данных спектральных измерений с интегрирующей сферой несамосветящихся порошкообразных сред. Одномерность модели Стокса-Бодо не является в данном случае большим недостатком, т.к. альbedo, измеренное интегрирующей сферой, является одномерной характеристикой.

Позднее модель Стокса-Бодо была существенно развита, в частности, в наших работах (Шкуратов, 1987, Старухина и Шкуратов, 1996, Shkuratov et al., 1999). В качестве коэффициентов отражения и пропускания на границах раздела в стопе были использованы коэффициенты Френеля, усредненные по углу падения от 0 до 90°. Это позволило, в частности, учесть эффект полного внутреннего отражения света в частицах. Одномерные модели не позволяют, однако, определить угловые зависимости интенсивности рассеянного света, поэтому при их использовании самым трудным и самым уязвимым для критики является сопоставление «одномерного» альbedo с «трехмерным» коэффициентом отражения сред, фигурирующим в практических задачах.

Рассматриваемая ниже модель (Shkuratov et al., 1999) описывает рассеяние света порошкообразной средой с оптическими константами n и k (соответственно, вещественная и мнимая части показателя преломления). Частицы среды считаются полупрозрачными и однородными. Отражение и преломление света поверхностью частиц характеризуется коэффициентами Френеля. Модель одномерна в том смысле, что все направления при многократном рассеянии делятся на два типа: рассеяние назад (в полусферу, содержащую источник света) и вперед (в противоположную полусферу). Выполним вначале усреднение по различным конфигурациям рассеяния лучей в частице. Пусть r_b и r_f – доли потока, рассеянного частицей назад и вперед, соответственно. Эти величины можно представить в виде рядов по кратности рассеяния:

$$r_b = R_b + T_e T_i \sum_{m=1}^{\infty} W_{m+1} R_i^{m-1} \exp(-m\tau), \quad (63)$$

$$r_f = R_f + T_e T_i \sum_{m=1}^{\infty} (1 - W_{m+1}) R_i^{m-1} \exp(-m\tau), \quad (64)$$

где W_m – вероятность выхода луча из частицы в направлении назад при m -м акте рассеяния; R_b и R_f – средние коэффициенты отражения назад и вперед, соответственно, τ – коэффи-

коэффициент поглощения (см. ниже). Величины R_b и R_f можно найти путем усреднения коэффициентов Френеля $R_0(n, \theta)$ по углам падения θ в предположении равновероятного распределения микрограней частиц по направлениям:

$$R_b = 2 \int_0^{\pi/4} d\theta \cdot R_0(n, \theta) \cos \theta \sin \theta, \quad (65)$$

$$R_f = 2 \int_{\pi/4}^{\pi/2} d\theta \cdot R_0(n, \theta) \cos \theta \sin \theta. \quad (66)$$

Через R_i обозначен средний коэффициент отражения внутри частицы:

$$R_i = \frac{n^2 - 1}{n^2} + 2 \int_0^{\theta_0} d\theta \cdot R_0\left(\frac{1}{n}, \theta\right) \cos \theta \sin \theta, \quad (67)$$

где $\theta_0 = \arcsin(1/n)$ – угол полного внутреннего отражения. Аналогично записываются средние коэффициенты пропускания света, проходящего внутрь частицы T_e и в противоположном направлении T_i . Поглощение $\tau = 4\pi\kappa/\lambda$ зависит от эффективного пути l в частице между двумя внутренними отражениями. Он находится через среднее значение экспоненты

$\exp\left(-\frac{4\pi\kappa}{\lambda} \sum_{i=0}^m l_i\right)$, описывающей поглощение света в частице, l_i – путь между двумя

последовательными отражениями (преломлениями): $\overline{\exp\left(-\frac{4\pi\kappa}{\lambda} \sum_{i=0}^m l_i\right)} = \exp\left(-\frac{4\pi\kappa}{\lambda} ml\right)$. Для

частиц произвольной формы l может быть найдено с помощью численного моделирования; оно составляет примерно $0,2D$, где D – диаметр частицы, независимо от того, какая кратность рассеяния рассматривается (Shkuratov and Grynko, 2005).

Обозначим через $R_e = R_b + R_f$ коэффициент внешнего отражения, усредненный по всем направлениям, тогда

$$\begin{cases} T_e = 1 - R_e \\ T_i = 1 - R_i \end{cases}. \quad (68)$$

Интегрирование в формуле (67) дает

$$R_i = 1 - (1 - R_e)/n^2, \quad (69)$$

поэтому $T_i = T_e/n^2$. Для $n = 1,4 - 1,7$ хорошую аппроксимацию дают выражения

$$\left. \begin{aligned} R_b &\approx (0.28n - 0.20)R_e \\ R_e &\approx r_0 + 0.05 \\ R_i &\approx 1.04 - 1/n^2 \end{aligned} \right\}, \quad (70)$$

где $r_0 = (n-1)^2/(n+1)^2$ – френелевский коэффициент отражения при нормальном падении.

Оценим вероятности W_m . Предполагаем, что для высоких кратностей рассеяния света внутри частицы вероятность выхода луча из частиц в направлении вперед и назад одинакова. Для малых кратностей рассеяния эта оценка неверна. Далее считаем, что $W_1 = 0$, а $W_m = 1/2$ при $m > 2$. При этом ряды (63) и (64) становятся прогрессиями и легко суммируются:

$$r_b = R_b + \frac{T_e T_i R_i \exp(-2\tau)}{2(1 - R_i \exp(-\tau))}, \quad (71)$$

$$r_f = R_f + T_e T_i \exp(-\tau) + \frac{T_e T_i R_i \exp(-2\tau)}{2(1 - R_i \exp(-\tau))}. \quad (72)$$

Найдем одномерную индикатрису слоя частиц. Этот слой включает две компоненты: частицы и пустоты; обозначим через s долю частиц в слое. Тогда индикатриса слоя выразится системой:

$$\left. \begin{aligned} \rho_b &= s \cdot r_b \\ \rho_f &= s \cdot r_f + 1 - s \end{aligned} \right\} . \quad (73)$$

Одномерное альbedo поверхности запишем в виде ряда по кратности рассеяния между верхним слоем и остальными слоями:

$$A = \rho_b + \rho_f^2 A + \rho_f^2 \rho_b A^2 + \dots = \rho_b + \rho_f^2 A / (1 - \rho_b A), \quad (74)$$

откуда

$$A = \frac{1 + \rho_b^2 - \rho_f^2}{2\rho_b} - \sqrt{\left(\frac{1 + \rho_b^2 - \rho_f^2}{2\rho_b} \right)^2 - 1}. \quad (75)$$

Важным достоинством описываемой модели является возможность оценить по известному альbedo мнимую часть показателя преломления, если задать значения параметров n , s и l . Уравнения (75) решается относительно κ :

$$\kappa = -\frac{\lambda}{4\pi l} \ln \left[\frac{b}{a} + \sqrt{\left(\frac{b}{a} \right)^2 - \frac{c}{a}} \right], \quad (76)$$

где

$$a = T_e T_i (y R_i + s T_e), \quad (77)$$

$$b = y R_b R_i + \frac{s}{2} T_e^2 (1 + T_i) - T_e (1 - s R_b), \quad (78)$$

$$c = 2y R_b - 2T_e (1 - s R_b) + s T_e^2, \quad (79)$$

$$y = (1 - A)^2 / 2A. \quad (80)$$

Далее мы проводим сопоставление результатов теоретического и компьютерного моделирования светорассеяния средами (Гринько и Шкуратов, 2003, Shkuratov and Grynko, 2005). Точки на рис. 2.6.11 показывают зависимости коэффициента отражения сред, составленных частицами разной формы, как функции поглощения $\exp(-\tau)$ при $\alpha = 60^\circ$, $n = 1,5$ и $s = 0,1$ (нормальное падение лучей). Сплошной кривой даны расчеты «одномерного» коэффициента отражения, рассчитанного по формуле (75). Как видно, данные компьютерного моделирования и теоретический расчет хорошо совпадают друг с другом для случая кубических частиц и частиц неправильной формы (RGF). Эти эксперименты позволили оценить точность одномерной геометрооптической модели светорассеяния порошкообразными средами (Шкуратов, 1987, Shkuratov et al., 1999), которая находит широкое применение в практике исследований планетных поверхностей [5].

В заключение отметим, что современные работы по светорассеянию, ведущиеся в НИИ астрономии, отличает комплексность подхода. Прежде всего, это сочетание строгого теоретического моделирования с полуэмпирическими моделями и компьютерными экспериментами. Такой подход может способствовать созданию надежной и содержательной интерпретационной базы в исследованиях поверхностей безатмосферных небесных тел.

Литература

- [1] Басс Ф. Г., Фукс И. М. Об учете затенений при рассеянии волн на статистически

неровной поверхности // Изв. ВУЗов, Радиофизика. – 1964. – Т. 7, № 1. – С. 101–112.

[2] *Smith B. G.* Lunar surface roughness: shadowing and thermal emission // *J. Geophys. Res.* – 1967. – 72, № 16. – С. 4059-4067.

[3] *Mishchenko M. I., Travis L.D., Lacis A. A.* Scattering, absorption, and emission of light by small particles, Cambridge: Cambridge University Press. – 2002. – 690 p.

[4] *Иванов А. П.* Оптика рассеивающих сред. – Минск: Наука и техника, 1969. – 592 с.

[5] *Poulet F., Cuzzi J.N., Cruikshank D.P., Roush T., Ore C.M.* Comparison between the Shkuratov and Hapke scattering theories for solid planetary surfaces. Application to the surface composition of two Centaurs // *Icarus.* – 2002. –160. – P. 313–324.

2.7. ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОРАССЕЯНИЯ РЕГОЛИТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

д.ф.-м.н. Ю. Г. Шкуратов, к.ф.-м.н. В. А. Псарев, к.ф.-м.н. А. А. Овчаренко

Введение

Лабораторные исследования оптических свойств структурных аналогов планетных реголитов впервые в Харьковской обсерватории начал проводить Н. П. Барабашов. В 1946 г. им, совместно с А. Т. Чекирдой, были выполнены индикатометрические измерения различных порошкообразных материалов с использованием фотоэлемента. В частности, был измерен мелкораздробленный базальт темного цвета, показавший более выраженный эффект обратного рассеяния, чем Луна (Барабашов и Чекирда, 1946). Индикатометр (прибор для измерения индикатрис рассеяния света) позволял проводить измерения при фазовых углах более 6° . Если бы этот предельный угол был меньше, открытие оппозиционного эффекта в лабораторных условиях могло быть сделано на 20 лет раньше; первая публикация на эту тему появилась лишь в 1966 г. [1]. Она вызвала сильную критику, т.к. в ней сообщалось об открытии оппозиционного пика яркости у светлых порошков, чего по представлениям того времени быть не должно (сейчас понятно, что этот эффект реален и обусловлен механизмом когерентного усиления обратного рассеяния).

Таким образом, лабораторное моделирование рассеяния света реголитоподобными поверхностями развивается в нашей обсерватории более 60 лет. Отметим, что в конце 50-х – начале 60-х годов лабораторные измерения позволили Барабашову сделать правильный вывод о структуре и несущей способности лунной поверхности. Лабораторные оптические измерения, начатые Н. П. Барабашовым, были продолжены его учеником Л. А. Акимовым, который, в частности, построил переносной индикатометр, использовавшийся для измерений фазовых зависимостей яркости образцов лунного грунта.

В настоящее время в НИИ астрономии лабораторные исследования структурных аналогов планетных грунтов активно развиваются. Эти исследования уже вышли за рамки чисто планетной тематики; они направлены на выяснения природы фотометрического и поляриметрического оппозиционных эффектов в широком физическом контексте. Лабораторные фотометрические и поляриметрические измерения позволяют производить проверку теоретических моделей рассеяния; потенциально они могут выявить новые закономерности, позволяющие усовершенствовать эти модели.

Данный раздел посвящен фотометрическим и поляриметрическим измерениям, проведенным с использованием инструментов, которые были созданы в НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина. В них для освещения используется неполяризованный источник света, что позволяет моделировать фазовые зависимости яркости и степени линейной поляризации реголитов безатмосферных небесных тел. Такое моделирование позволяет сделать выводы относительно физических свойств планетных реголитов (например, Shkuratov et al., 2004). Инструменты создавались и усовершенствовались в разное время Л. А. Акимовым, С. Ю. Бондаренко, А. А. Овчаренко, В. В. Псаревым, Д. Г. Станкевичем, Ю. Г. Шкуратовым. Следует также отметить серии измерений различных материалов (включая метеориты), выполненные Н. Н. Бельской и Д. Ф. Лупишко в связи с моделированием рассеивающих свойств поверхности астероидов.

В этом разделе мы обсуждаем результаты некоторых избранных (в основном последних по времени) измерений, которые были проведены в широком диапазоне фазовых углов, включая диапазон предельно малых углов. В частности, здесь приводится сравнение рассеивающих свойств изолированных частиц и поверхностей, состоящих из этих частиц. Данные для этого сравнения были получены в одном и том же диапазоне фазовых углов, $7 - 150^\circ$, харьковским инструментом (измерения рассеяния поверхностью) и инструментом Университета Амстердама (измерения рассеяния частиц в воздухе) (Shkuratov et al., 2006). Эта

область включает максимум положительной поляризации и часть ветви отрицательной поляризации при малых фазовых углах.

Ниже мы подробнее обсуждаем измерения, проведенные при малых углах фазы. Моделирование узкого фотометрического и поляриметрического оппозиционных эффектов в лаборатории – непростая задача, т. к. для таких измерений необходимо использование очень малых угловых апертур источника и приемника света. Один из фотополяриметров (Ovcharenko et al., 2004, Shkuratov et al., 2002) работает при фазовых углах, начинающихся от $0,2^\circ$. С помощью этого инструмента были выявлены интересные закономерности. В частности, мы нашли систематические зависимости параметров отрицательной поляризации от размеров частиц образца. Предел в $0,2^\circ$ представляется все еще слишком большим для моделирования ярких пиков некоторых объектов. Поэтому был создан третий прибор, позволяющий проводить измерения, начиная от $0,008^\circ$ (Psarev et al., 2007).

Этот обзор представляет некоторые результаты измерений, проведенных с использованием упомянутых лабораторных фотополяриметров. Они покрывают разные, но пересекающиеся диапазоны фазовых углов. Все инструменты взаимно калиброваны путем измерения одних и тех же образцов при одинаковых фотометрических условиях. Один из приборов, работающий в диапазоне углов $2 - 150^\circ$, мы для краткости называем широкоугловым фотополяриметром, другой прибор ($0,2 - 17^\circ$) называется малоугловым фотополяриметром. Третий, использующий лазер, покрывает область фазовых углов $0,008 - 1,6^\circ$ (лазерный фотометр предельно малых фазовых углов).

Отметим большой труд по изготовлению образцов и обработке данных наших ранних фотополяриметрических измерений Н. П. Станкевич (Стадникова), Т. Б. Богдановой (Есипенко) и И. И. Латыниной. В частности, за неимением места в рабочих помещениях, Нина Петровна Станкевич изготовила методом отмучивания размерные фракции стекол разной окраски у себя в однокомнатной квартире. Почти все горизонтальные поверхности в комнате и кухне были заполнены стаканчиками с водяными взвешями порошков. Не надо говорить сколько неудобств испытали жильцы этой квартиры на протяжении нескольких месяцев во имя науки ...

Лабораторный фотополяриметр для исследования лунного грунта

Сотрудник нашей обсерватории Л. А. Акимов создал портативный лабораторный фотометр-поляриметр, который использовался для измерения индикатрис рассеяния лунного грунта. Позднее этот прибор позволял измерять также степень поляризации рассеянного света (рис. 2.7.1). В качестве источника света прибор использовал лампу накаливания. Измеренный сигнал выдавался на самописец или цифровую печать; обработка данных была тогда очень трудоемка. Минимальный фазовый угол, при котором этот прибор позволял проводить измерения, составлял 1° . Он позволил провести исследования оппозиционного эффекта яркости у многих образцов. Мы несколько раз привозили этот индикатор в ГЕОХИ АН СССР для измерений образцов лунного грунта (Акимов и др., 1979). Пожалуй, наиболее значимым результатом этих измерений было открытие минимума фазовой зависимости показателя цвета некоторых лунных образцов (рис. 2.1.14). Этот минимум является следствием спектральных отличий индикатрис однократного рассеяния света частицами лунного грунта.

Этот прибор неоднократно совершенствовался; на нем были проведены большие серии измерений как природных образцов, так и образцов искусственного происхождения (Шкуратов и др., 1987, 1988). Одним из результатов было обнаружение значительного усиления отрицательной поляризации у смесей оптически контрастных веществ (Шкуратов, 1987). Пример таких измерений приведен на рис. 2.7.2, на котором показаны измерения светлого порошка MgO , сажи и их смеси. Аналогичные данные приведены для смеси серого и светлого стекла (менее контрастных компонент); здесь усиление отрицательной поляризации не столь сильно выражено.

Широкоугловой фотополяриметр

Этот инструмент позволяет измерять фазовые кривые яркости и степени линейной поляризации порошкообразных образцов при освещении неполяризованным светом. Фотография прибора приведена на рис. 2.7.3. Используются две спектральные полосы с $\lambda_{\text{eff}} =$

0,49 мкм и $\lambda_{\text{eff}} = 0,66$ мкм (полуширина приблизительно 10%). Поляриметрические измерения имеют точность около 0,05%. Спектральные полосы формируются светофильтрами с учетом спектральных особенностей фотометра. Измерения в диапазоне фазовых углов $2 - 150^\circ$ производятся посредством поворота алидады с источником света (лампой). Широкий диапазон углов возможен, когда угол визирования относительно нормали к образцу велик; в наших измерениях он составляет 70° (рис. 2.7.3). Плоскость рассеяния перпендикулярна поверхности образца. Линейный размер порошкообразного образца примерно 10×20 мм. Толщина образца около 4 – 5 мм, что обеспечивает хорошее приближение к полубесконечной среде. Отражательная способность образцов определяется относительно сжатого образца Halon [2] при угле фазы 2° .

Описываемый широкоугольный фотополариметр использовался для проведения нескольких серий измерений порошкообразных образцов. В частности, были выполнены измерения размерных фракций различных материалов. Например, на рис. 2.7.4 показаны измерения порошков стекла КС-17 с разными средними размерами частиц. Хорошо видно, что с увеличением размеров частиц ветвь отрицательной поляризации становится мельче, уже и асимметричнее.

Важной задачей является сравнение фотометрических и поляриметрических измерений изолированных частиц и порошкообразных поверхностей, которые состоят из этих частиц. Такое сравнение, например, позволяет оценивать вклад однократного и многократного рассеяния в формирование максимума положительной поляризации. Оно также дает возможность проверить применимость классической теории переноса излучения к порошкообразным поверхностям. В нашем распоряжении оказались образцы различных порошкообразных материалов, для которых были измерены фазовые зависимости интенсивности и поляризации изолированных частиц с помощью установки Университета Амстердама (измерения рассеяния частиц, взвешенных в воздухе) [3]. Мы сравнивали измерения рассеяния света в диапазоне фазовых углов $7 - 150^\circ$, являющимся общим для нашего инструмента и голландского. Было показано, что обратное рассеяние порошкообразными поверхностями частично формируется одночастичным рассеянием. Кроме того, показано, что отрицательная поляризация поверхностей является остатком отрицательной поляризации рассеяния изолированными частицами (Shkuratov et al., 2004, 2006). Отчасти это относится и к максимуму положительной поляризации (Shkuratov et al., 2007). Для примера на рис. 2.7.5 показаны результаты измерений интенсивности и степени поляризации при двух длинах волн для порошка полевого шпата. Кривые представляют измерения для изолированных частиц и порошкообразной поверхности до сжатия и после. В случае изолированных частиц наблюдается сильное рассеяние вперед и сравнительно слабое увеличение интенсивности обратного рассеяния. Все сжатые образцы также демонстрируют сильное рассеяние вперед. Свободно насыпанные образцы, как правило, не показывают этой особенности.

Малоугольный фотополариметр

Этот инструмент также измеряет фазовые зависимости интенсивности и линейной поляризации света. Прибор работает в диапазоне фазовых углов $0,2 - 17^\circ$ (рис. 2.7.6) с использованием неполяризованного источника света (лампа накаливания). Измерения на этом фотополариметре проводятся практически в тех же спектральных полосах, которые используются и в широкоугольном приборе. Это позволяет производить взаимную калибровку и взаимное дополнение данных. Угловой диаметр источника и приемника света составляет $0,05^\circ$.

Инструментальная (паразитная) поляризация является очень серьезной проблемой в лабораторных поляриметрических измерениях. Определение и коррекция инструментальной поляризации, связанной с источником света, – наиболее сложная проблема. Поляризация галогеновой лампы может достигать нескольких процентов. Основную часть паразитной поляризации мы компенсируем введением в световой пучок наклонной стеклянной пластинки толщиной 300 μm . Она уменьшает аппаратную поляризацию до нескольких десятых процента. Остаточная паразитная поляризация компенсируется деполаризатором Лию. Инструментальная поляризация приемной части определяется с помощью диффузного источника света, расположенного вместо образца. Этот источник света представляет собой лампу накаливания, покрытую двумя матированными пластинками. Измерения, получаемые при двух положениях диффузного калибровочного источника света, позволяют нам определить инструментальную поляризацию приемника света. Величина инструментальной

поляризации приемника составляет около 0,03%. Она очень стабильна (с вариациями < 0,001%) и принимается в расчет при обработке результатов.

Образцы для малоуглового фотополяриметра имеют диаметр 60 мм. Изменение фазового угла производится поворотом источника света вокруг оси, лежащей на поверхности образца, приемник при измерении остается неподвижным. Оптическая схема инструмента такова, что позволяет очень близко поднести источник света к апертуре приемника. Источник света движется от приемника только по одну сторону, в широкоугловом фотополяриметре источник света может приближаться к приемнику с двух сторон.

Малоугловой фотополяриметр сконструирован так, что оптическая ось его приемника наклонена к нормали к плоскости горизонта на 5 градусов. Это позволяет нам проводить исследования как порошкообразных образцов, так и измерения коллоидных растворов в жидкости для изучения рассеяния света в разреженных средах, так как при этом блик от поверхности жидкости не ослепляет приемник света.

Измерения рассеивающих свойств образцов проводятся в два прохода, с увеличением и с уменьшением фазового угла. Отклонения между результатами позволяют оценить инструментальную погрешность. Если отклонения значительны, измерение повторяется заново. Для малоуглового фотополяриметра минимальный шаг по фазовому углу составляет $0,027^\circ$, и процесс получения данных для одного образца иногда может длиться до 70 часов для достижения необходимой точности измерения. Чтобы выбрать диапазон для более детального изучения, иногда проводятся предварительные измерения с малым разрешением по фазовому углу ($0,5^\circ$). Обычно наиболее интересной областью является диапазон самых малых углов. Альbedo образцов определяется при 2° относительно сжатого образца Halon, который используется как фотометрический стандарт и при измерениях на широкоугловом фотополяриметре. Малоугловой фотополяриметр протестирован с помощью прибора, работающего в JPL NASA (Nelson et al., 1999). Оба прибора позволяют проводить измерения при фазовых углах меньше одного градуса, где фотометрические фазовые кривые обычно показывают большой наклон. Сравнение измерений одних и тех же образцов на этих двух приборах показало хорошее согласие.

На рис. 2.7.7 представлены фазовые кривые интенсивности (нормированные на $0,2^\circ$) и степени линейной поляризации света, рассеянного порошками ярких (Al_2O_3) и темных (B_4C) частиц со средним размером около 30 мкм. Кривые получены двумя фотополяриметрами, малоугловым и широкоугловым; данные, полученные этими разными инструментами, находятся в хорошем согласии. Видно, что темные и светлые образцы демонстрируют очень разное поведение вблизи оппозиции. Для образца карборунда с размерами частиц около 3 мкм ветвь отрицательной поляризации относительно узкая, с углом инверсии α_{inv} близкими к 14° и P_{min} около -0,7%. Для соответствующих фракций оксида алюминия отрицательная поляризация очень мала, около 0,15%. Зависимости яркости также сильно отличаются для темных и ярких поверхностей. Действительно, темный порошок показывает почти линейную фазовую кривую с амплитудой пика около 45% в диапазоне фазовых углов 0 – 20° , тогда как яркий образец оксида алюминия обнаруживает очень выраженную нелинейную зависимость при фазовых углах < 4° . В этом случае когерентное усиление обратного рассеяния вносит основной вклад в формирование пика. Однако почти линейное уменьшение интенсивности при фазовых углах больше 4° показывает существенное влияние теневого эффекта, несмотря на высокое альbedo образца оксида алюминия.

Лазерный фотополяриметр предельно малых фазовых углов

Для проведения измерений при фазовых углах порядка нескольких тысячных градуса было решено создать прибор с большим расстоянием между источником света и образцом, используя шахту лифта в здании Харьковского национального университета. Этот инструмент позволил бы проводить измерения при расстоянии, равном 40 метрам, и достичь углов порядка $0,005^\circ$. Вскоре мы отказались от этого варианта прибора, обнаружив, что такие измерения требуют высокой чистоты рабочего помещения. Свет, рассеянный пылевыми частицами на пути лучей, может значительно исказить фазовые зависимости темных образцов, давая ложный оппозиционный пик яркости, который похож на оппозиционные пики порошкообразных поверхностей. Окончательная версия инструмента (лазерного лабораторного фотополяриметра предельно малых фазовых углов) была собрана в лаборатории (загородная наблюдательная станция), в которой расположен аналоговый процессор для

Фурье-преобразования больших изображений. Новый инструмент позволяет проводить высококачественные измерения с минимальным углом фазы $0,008^\circ$ (Psarev et al., 2007).

Лабораторный фотополариметр предельно малых фазовых углов сконструирован на базе оптической скамьи. Прибор позволяет исследовать оппозиционный эффект поверхностей сложной структуры, расположенных как вертикально, так и горизонтально. Рабочий диапазон фазовых углов прибора – $0,008 - 1,6^\circ$. Для измерений при предельно малых фазовых углах необходимы маленькие апертуры источника и приемника света и большое расстояние от них до образца. В нашем случае размер апертуры приемника составляет 1 мм, расстояние до образца – 25 м.

Лаборатория представляет собой комнату, защищенную от пыли. В измерениях в качестве источника света используется одномодовый поляризованный полупроводниковый лазер с длиной волны 0,658 мкм и мощностью 50 мВт. Диаметр выходного пучка света – 1,4 мм. В качестве объектива приемника используется камера-обскура, представляющая собой круговой конус с усеченной верхушкой (см. рис. 2.7.8). Линейный диаметр используемых образцов – 7 см. Фазовый угол изменяется путем перемещения блока приемника. Разрешение по фазовому углу около $0,008^\circ$. Приемник состоит из камеры-обскуры с фотоумножителем внутри и соосной визирной трубкой (оптическим прицелом). Прицел нужен для наводки приемника на образец после изменения фазового угла. Каждый образец измеряется как минимум дважды, с увеличением и с уменьшением фазового угла. Совпадение этих двух зависимостей является критерием воспроизводимости измерений.

Исследование паразитного светового рассеяния пылью и воздухом является очень важным моментом при измерениях низкоальбедных образцов. Для учета такого рассеяния мы используем светофильтр, полностью поглощающий лазерный свет. Светофильтр вводится в лазерный пучок (вместо образца) с небольшим наклоном для того, чтобы отвести блик от приемника света. Таким образом, мы регистрируем только свет, рассеянный пылью в воздухе. Мы учитываем этот ложный пик при обработке данных.

Для борьбы со спекловым шумом образец устанавливается на подпружиненный держатель, который двигается во время измерений, позволяя выполнить хорошее усреднение.

В обычной схеме измерений образцы необходимо устанавливать в приборе вертикально. Однако исследования порошкообразных образцов также возможны. Для этого используется большая призма полного внутреннего отражения (10×10 см), которая поворачивает лучи на 90° вниз. Это дает возможность проводить измерения горизонтально расположенных образцов.

На рис. 2.7.9 представлены результаты измерений трех образцов с разным альбедо и структурой: очень яркая поверхность осажденного MgO , пушистый светлый порошок, состоящий из очень мелких частиц SiO_2 (размеры частиц около 10 нм), и очень темная поверхность осажденной углеродной сажи. Все измерения, представленные здесь, были сделаны при длине волны $\lambda = 0,658$ мкм. Мы использовали толстые слои материалов, чтобы избежать влияния подложки; все три поверхности очень пористые, особенно поверхность образца SiO_2 . Каждая точка фазовых кривых на рис. 2.7.9 является результатом усреднения трех измерений. Продолжительность каждого измерения 2 сек. Кривые для MgO и сажи находятся в хорошем согласии с подобными зависимостями, полученными для тех же образцов на малоугловом фотополариметре. Рисунок 2.7.9 показывает, что образцы MgO и SiO_2 имеют очень выраженный оппозиционный пик при фазовых углах меньше $0,4^\circ$. Этот пик обусловлен эффектом когерентного усиления обратного рассеяния; он подобен пикам, наблюдаемым на некоторых объектах пояса Койпера и ледяных спутниках. Темный образец сажи не показывает оппозиционного пика яркости; его фазовая кривая почти линейна в диапазоне $0,008^\circ - 1,5^\circ$. Этот ход может объясняться теньвым эффектом. Пушистый образец SiO_2 демонстрирует очень узкий оппозиционный пик, начинающийся почти с $0,1^\circ$. Его амплитуда примерно равна амплитуде пика образца MgO .

Мы представили результаты нескольких экспериментов, проведенных для углубления нашего понимания влияния различных факторов на оппозиционный пик яркости и отрицательную поляризацию. Для этого использовались разные инструменты, покрывающие как малые, так и большие фазовые углы. Эти измерения уникальны; они сделали НИИ астрономии одним из мировых центров по изучению рассеивающих свойств реголитоподобных поверхностей. Наш опыт работы и ее результаты широко используются, в частности, в таких

учреждениях, как Лаборатория реактивного движения США, Военная исследовательская лаборатория США и Морская исследовательская лаборатория США.

Литература

[1] *Oetking P.* Photometric studies of diffusely reflecting surfaces with applications to the brightness of the Moon // J. Geophys. Res. – 1966. – V. 71, No 10. – P. 2505 – 2513.

[2] *Weidner V, Hsia J.* Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder // J. Opt. Soc. Am. – 1981. – 71. – P. 856–61.

[3] *Volten H, Muñoz O, Rol E, de Haan J, Vassen W, Hovenier J, Muinonen K, Nousianen T.* Scattering matrices of mineral aerosol particles at 441.6 nm and 632.8 nm // J. Geophys. Res. – 2001. – 106. – P. 17, 375–401.

2.8. ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТЯХ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

к.ф.-м.н. Л. В. Старухина

Безатмосферными космическими объектами являются твердые тела в космическом пространстве, поверхность которых не окружена (или окружена слабой) газовой оболочкой. К ним относятся объекты различных размеров, строения и происхождения. Это планеты (Луна, Меркурий, Марс), астероиды, кометы, метеоритные тела, а также космическая пыль – межпланетная, межзвездная или околозвездная. Все эти объекты объединяет то, что их поверхности не защищены от столкновений даже с мелкими метеоритами и от космических излучений. Ни слабая магнитосфера Меркурия, ни разреженные атмосферы комет не могут полностью защитить их поверхности от таких воздействий.

Поверхность крупных безатмосферных тел покрыта обломочным материалом – реголитом, верхние слои которого представляют собой мелкий песок. Изменения такой поверхности под воздействием космической среды называют созреванием. Эти изменения касаются физических и химических свойств реголита как на макроскопическом уровне (грунт в целом), так и на микроскопическом (поверхностные нанослои частиц). Они влияют на оптические свойства грунта, в первую очередь, на его спектр. Созревание поверхностей, сложенных силикатами или смесями льдов с органическим веществом, проявляет себя заметным потемнением и покраснением. Некоторые процессы в твердых частицах, происходящие под действием космогенных факторов, могут быть промоделированы теоретически или в лабораторных условиях. Ряд работ такого рода был выполнен в нашем НИИ астрономии.

Образование и эволюция органического вещества в космическом пространстве

Поверхность безатмосферных тел подвержена воздействию ионизирующих излучений. Это, главным образом, протоны в диапазоне энергий от КэВ (звездный, в частности, солнечный, ветер) до МэВ (солнечные космические лучи) и ГэВ (галактические космические лучи), а также фотоны от ультрафиолетового до рентгеновского диапазонов. В околозвездной среде спектры этих излучений таковы, что число частиц быстро падает с увеличением их энергии (за исключением участка модуляции спектра галактических лучей звездным ветром). Проникающая способность этих излучений, наоборот, возрастает с увеличением энергии, при этом максимум энерговыделения смещается вглубь мишени. В результате, поверхностный слой твердого вещества толщиной ~100 – 1000 ангстрем облучается в околозвездной среде (в частности, в Солнечной системе), главным образом, звездным (в частности, солнечным) ветром – протонами с энергией ~1–10 КэВ. В этом разделе мы рассмотрим химические эффекты такого облучения.

Широко известно, что ионизирующие излучения представляют опасность для живых организмов, так как могут изменять и разрушать сложные многоатомные молекулы, входящие в их состав. Менее тривиальным обстоятельством является то, что свободные радикалы, создаваемые такими излучениями, могут способствовать образованию новых химических связей, что наблюдали во многих лабораториях, например, [1, 2], в частности, простейших органических молекул из неорганического вещества. Это делает возможным органический синтез в условиях космического пространства.

Органическое вещество, основными элементами которого являются связанные между собой атомы углерода и водорода, может образовываться и эволюционировать в результате одного из двух противоположных процессов – карбонизации и гидрогенизации, при которых происходит обогащение исходного углеродсодержащего вещества атомами, соответственно, углерода и водорода. Первый из этих процессов имеет место в смесях льдов H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 и других замороженных газов, встречающихся на периферии планетных систем – в частности, на поверхности спутников Юпитера и Сатурна, транснептуновых объектов и комет. Под действием ионизирующих излучений происходит обогащение смесей льдов более тяжелыми атомами и соединение их с углеродом в органические

молекулы. Так, после облучения твердого метана (CH_4) ионами $^3\text{He}^{2+}$ с энергией 20 МэВ обнаружены разнообразные молекулы, включая полиароматические соединения (ПАУ), включающие в себя два и более бензольных колец [3].

Появление органического вещества во льдах проявляет себя оптически их потемнением и «покраснением»: органические молекулы поглощают свет в ультрафиолетовом диапазоне, и края полос поглощения дают большее потемнение в синей области спектра, чем в красной. В результате первоначально «белые» образцы льда (кривая 0 на рис. 2.8.1) по мере облучения постепенно приобретают коричневатый цвет (кривые 1-3 на рис. 2.8.1). Спектры такого материала напоминают спектры ряда небесных тел: D-астероидов, спутников Юпитера и Сатурна, транснептуновых объектов.

Дальнейшая эволюция органического вещества на поверхности D-астероидов и транснептуновых объектов при его облучении изучалась в совместных работах сотрудников Харьковской обсерватории с сотрудниками Немецкого аэрокосмического центра (DLR) и обсерватории г. Катанья (Сицилия) (Moroz et al., 2003, 2004, 2007). При облучении органических веществ асфальтитового ряда ионами, летящими со скоростью солнечного ветра, происходило обеднение мишеней водородом за счет уменьшения числа алифатических групп ($-\text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$) и увеличения концентрации ароматических групп, то есть структура органического вещества приближалась к графитоподобной. Это приводило к дальнейшему увеличению поглощения света частицами образцов, и они заметно темнели в диапазоне 1 – 2.5 мкм. При этом в видимом диапазоне мнимая часть показателя преломления возрастала настолько, что частицы приобретали металлический блеск, а отражательная способность образца в видимой области увеличивалась. В результате первоначально наклонный спектр становился плоским, подобным спектру графита (кривая 4 на рис. 2.8.1).

Таким образом, лабораторные эксперименты показали, что потемнение поверхностей ледяных тел в результате эволюции органического вещества под действием космических излучений лишь в начале сопровождается характерным «покраснением» спектра, далее спектральный наклон должен уменьшаться с экспозиционным возрастом, т. к. потемнение затрагивает и ближний ИК диапазон. Этот вывод согласуется с данными о цветовых вариациях в динамически изолированных популяциях темных астероидов. Наиболее многочисленные мелкие астероиды групп Гильды и Кибелы обладают большими амплитудами кривых блеска и большими разбросами скоростей вращения и спектральных наклонов, чем более крупные астероиды тех же групп [4, 5], что свидетельствует в пользу более позднего образования мелких астероидов в результате столкновений. Такие «молодые» астероиды оказались более «красными», чем крупные астероиды тех же групп [5], чьи оптические и динамические характеристики указывают на больший возраст их поверхностей.

Однако длительное облучение не может полностью уничтожить органическое вещество, превратив его в графит, поскольку ионная бомбардировка не только разрушает имеющиеся химические связи C–H, но и образует новые. При большой концентрации водорода в образце преобладает разрушение C–H-связей, при малой – их образование, т. е. процесс гидрогенизации. Образование на поверхности графита простейших органических молекул – газов CH_4 , C_2H_2 – при его облучении протонами с энергией порядка кэВ наблюдалось физиками, исследовавшими свойства графита как перспективного материала внутренней стенки термоядерных реакторов (см. обзоры [6, 7]).

Образование более сложных органических молекул на поверхности облучаемого графита изучалось в Харьковской обсерватории (Шкуратов и др., 1986, Shkuratov et al., 1987, Старухина и др., 1991, Старухина и Шкуратов, 1994, Starukhina and Shkuratov, 1995). Было обнаружено, что при облучении графита протонами и другими ионами с энергией, близкой к энергиям ионов солнечного и звездного ветра (H, He, N, 10 КэВ), на поверхности образуются органические вещества – полиароматические углеводороды (ПАУ). Энергичные ионы как бы вырезают фрагменты гексагональной графитовой сетки, так что крайние атомы углерода образующихся молекул оказываются связанными не с соседями по кристаллической решетке, а с атомами водорода.

Вначале появление ПАУ после облучения было выявлено на основании спектров УФ поглощения гексановых экстрактов облученного и необлученного образцов (Шкуратов и др., 1986); в дальнейшем был сделан качественный и количественный анализ полученных ПАУ (Старухина и др., 1991). Были обнаружены нафталин, фенантрен, бензофлуорен, пирен. Эти лабораторные эксперименты моделируют две ситуации, возникающие в космическом пространстве.

(1) Вблизи углеродных звезд имеются облака графитовой пыли, облучаемые звездным

ветром. ПАУ – самые распространенные органические молекулы в межзвездной среде [8]. Их синтез в газовой фазе затруднен из-за разреженности среды. Количественный анализ ПАУ, полученных нами при лабораторном облучении, показал, что количество ПАУ, наблюдаемое в межзвездной среде, можно объяснить их образованием на поверхности графитовых пылинок, облучаемых звездным ветром (Старухина и Шкуратов, 1994, Starukhina and Shkuratov, 1995).

(2) В солнечной системе графитоподобные отложения могут иметь место вокруг кратеров на поверхностях углеродсодержащих тел, например, астероидов С-типа или на Фобосе [9]. Как следует из наших экспериментов, под действием солнечного ветра графитоподобное вещество на поверхности может быть снова преобразовано в органическое. В частности, так могла образоваться часть ПАУ, имеющих в углеродсодержащих метеоритах – углистых хондритах. Образование ПАУ на поверхности графитовых отложений проявляет себя поглощением в ультрафиолетовой области (Shkuratov et al., 1987), подобным тому, что имеет место в спектре Фобоса и углистых хондритов. При образовании ПАУ металлический блеск графита сменяется полосой поглощения, характерной для поглотителя-диэлектрика.

Моделирование состава поверхности Фобоса

Интерес к моделированию процессов на углеродсодержащих телах и их спектров в значительной мере был вызван миссией «Фобос» в 1988 году. Плотность, альbedo и поляриметрические характеристики Фобоса указывали на то, что его ближайшим метеоритным аналогом являются углистые хондриты (Шкуратов и др., 1988, Жуков и др., 1994, Шкуратов, 1994) – метеориты, содержащие до нескольких процентов органического вещества. На это указывали и спектральные данные [10]: плоский спектр в диапазоне 0,4 – 1,1 мкм и резкое падение отражения на более коротких волнах. Однако более поздние измерения, проведенные на АМС «Фобос-2» [11] и космическом телескопе «Хаббл» [12] показали, что спектр Фобоса имеет красный наклон, характерный для D-астероидов, но альbedo Фобоса почти вдвое выше. Это может быть вызвано космогенными факторами, которые воздействуют как на силикатную, так и на органическую компоненту материала поверхности. Кроме солнечного ветра и метеоритной бомбардировки, на поверхность спутников Марса может оказать влияние дополнительный фактор – пыль, попадающая с Марса.

При помощи теоретической модели спектрального хода альbedo многокомпонентных реголитоподобных поверхностей (Старухина и Шкуратов, 1996, Shkuratov et al., 1999) было промоделировано влияние различных факторов на спектр углистого хондрита самого примитивного (CI) типа – метеорита Оргей (Старухина и Шкуратов, 1997). Хотя модель является геометрооптической, она позволяет работать не только со смесями частиц много больше длины волны λ , но и с квазиоднородными тонкодисперсными ($\ll \lambda$) смесями компонент, а также с частицами, покрытыми тонкими ($\ll \lambda$) пленками или содержащими выделения наночастиц вблизи поверхности или в объеме частиц реголита. Модель является обратимой, т. е. по спектру альbedo среды, состоящей из полупрозрачных частиц, позволяет определить спектр мнимой части показателя преломления $\kappa(\lambda)$ (точнее, оптической плотности $\tau(\lambda)$) частиц. Беря за основу такой спектр и спектры $\kappa(\lambda)$ дополнительных компонент, можно модифицировать состав реголита и вычислять спектр альbedo смеси.

Как известно из анализа образцов лунного грунта, воздействие космогенных факторов на силикатные частицы приводит к образованию в них зерен восстановленного железа $n\text{Fe}^0$ [13] среднего размера 50 ангстрем [14], что вызывает потемнение и покраснение грунта. Теоретическое моделирование изменения спектра лунного грунта при образовании зерен $n\text{Fe}^0$ было впервые сделано в работе (Starukhina et al., 1994). Аналогичное моделирование изменения спектра углистого хондрита Оргей показало, что его форма еще достаточно далека от спектра Фобоса. Моделирование добавления к веществу углистых хондритов красной марсианской пыли также не воспроизвело наклонный спектр Фобоса.

Таким образом, спектр Фобоса свидетельствует об отличии состава его органического вещества от вещества углистых хондритов. Авторы работы [12] предположили, что состав Фобоса напоминает состав D-астероидов. D-астероиды не имеют метеоритных спектральных аналогов, но имеют аналог лабораторный [15] – смесь минералов глин с полимерным органическим веществом. В непрерывном ряду природных органических полимеров – битум-

ном ряду – наклон спектра в видимом и ближнем ИК диапазоне падает с уменьшением концентрации алифатических связей, т. е. с возрастанием степени карбонизации, стремясь в пределе (для графита) к нулю.

В работе (Старухина и Шкуратов, 1997) построена модель спектра Фобоса из составляющих, подобных использованым в лабораторном моделировании [15]. Частицы на поверхности Фобоса представлены в виде тонкодисперсной смеси гидросиликатов и веществ битумного ряда (рис. 2.8.2 а). В качестве исходных данных для вычислений брались измеренные спектры отражения этих веществ [16,17]. Расчеты показали, что более высокое альbedo Фобоса по сравнению с D-астероидами может быть объяснено примерно в полтора раза меньшим размером частиц на Фобосе, что представляется возможным в связи с более интенсивной метеоритной бомбардировкой вблизи орбиты Марса. В отличие от модельных спектров (рис. 2.8.2 а), спектр Фобоса не содержит полос поглощения кристаллизационной воды и групп ОН (1,4 мкм, 1,9 и 2,7 мкм), за исключением слабо выраженной полосы 2,7 мкм, что можно объяснить дегидратацией при метеоритной бомбардировке. Для дегидратации достаточно разогрева гидросиликатов до $\approx 600^\circ\text{C}$, что заведомо достигается при метеоритных ударах.

Таким образом, органическое вещество поверхности Фобоса, по-видимому, содержит больше алифатических групп, т. е. больше водорода, чем органические полимеры углистых хондритов. Другой возможной моделью поверхности Фобоса является материал, структурно неоднородный в субмикронных масштабах, покрытый углеродной пленкой. Такая пленка могла конденсироваться на поверхности при осаждении ударного пара [9]. На рис. 2.8.2 б показаны результаты лабораторного и теоретического моделирования осаждения углеродной пленки на поверхность тонкодисперсной смеси сажи и MgO. Тонкая структура смеси, где темные и светлые зерна чередуются в субмикронных масштабах, ответственна за фотометрические и поляризметрические свойства углистых хондритов и Фобоса, что и определяет выбор структурного аналога. Из рис. 2.8.2 б видно, что спектр отражения вещества, являющегося аналогом углистых хондритов лишь по структуре, приближается к спектру Фобоса при маскировании тонкой углеродной пленкой. Сходство со спектром Фобоса становится еще ближе после облучения этой пленки протонами дозой 10^{16} см^{-2} с энергией 10 кэВ, имитирующими воздействие солнечного ветра (Шкуратов и др., 1988). В отличие от облученных веществ битумного ряда (см. выше), наклон спектра углеродной пленки графитоподобной структуры при облучении увеличивается.

Влияние контактов между частицами на физические свойства лунного грунта

Лунный грунт удивил исследователей тем, что его частицы необычайно сильно слипались между собой и прилипали к другим предметам: поверхности космических аппаратов, костюмам астронавтов и т. п. Многие физические свойства лунного грунта подробно изучались. В то же время, его когезия исследовалась мало, а ее механизмы поняты в недостаточной мере. Механизмы когезии и их следствия детально проанализированы в наших работах, см., например, (Старухина, 2000).

Почему реголитовые частицы слипаются? Из «земного» опыта мы знаем, что лучше всего слипаются частицы, покрытые влагой: поверхностное натяжение пленки воды скрепляет их между собой, – в то время как сухой песок весьма рассыпчатый. Можно было ожидать, что лунный песок, который является абсолютно сухим, будет еще более рассыпчатым, а оказалось наоборот. Причина в чистоте лунной поверхности, недостижимой в земных условиях.

Физический механизм когезии прост: вместо двух поверхностей с удельными энергиями α_1 и α_2 в области контакта частиц образуется одна – граница раздела с удельной энергией α_{12} . Чем больше разность $\Delta\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_{12}$, тем больше выигрыш в энергии при слипании частиц и больше сила, удерживающая контакт: $F_c = 2\pi\Delta\alpha/(1/R_1 + 1/R_2)$, где R_1 и R_2 – радиусы кривизны частиц в местах контактов. Для двух одинаковых сферических частиц радиуса R : $F_c = \pi R\Delta\alpha$; для частиц, сильно различающихся по размерам ($r \ll R$) $F_c = 2\pi r\Delta\alpha$, т. е. сила определяется большей кривизной мелкой частицы. Последняя формула описывает также силу слипания между частицами с шероховатой поверхностью; тогда r – радиус кривизны шероховатости.

Поверхностное натяжение твердого вещества с высокой температурой плавления на порядок превышает привычное поверхностное натяжение жидкостей. В земной атмосфере

энергия твердой поверхности не проявляет себя, так как все поверхности покрыты адсорбированными слоями – газами, водой, органическим веществом, – которые резко понижают поверхностную энергию, снижая прочность контактов между частицами. Даже разреженная атмосфера типа марсианской может приводить к понижению поверхностной энергии частиц. В высоком вакууме космического пространства мы имеем твердые поверхности высокой чистоты; для них сила слипания F_c определяется значениями $\Delta\alpha$, характерными именно для твердого вещества, и поэтому сцепление частиц оказывается заметно прочнее известного нам из земного опыта.

Это свойство чистой поверхности сохраняется довольно длительное время, особенно при хранении образцов в вакууме. Поскольку в формулу для силы входит $\Delta\alpha$, то для хорошего сцепления достаточно чистоты лишь одной из соприкасающихся поверхностей. Земной аналог чистой поверхности – свежий скол, который также обладает значительной адгезией.

Как измерить площадь контакта между частицами? Средняя площадь межчастичных контактов πR_c в образце определяет такие макроскопические свойства грунта, как электро- и теплопроводность. Электропроводность диэлектриков, составляющих частицы грунта, может различаться на много порядков, в то время как теплопроводность отличается незначительно, поэтому можно оценить теплопроводность пористого материала η , исходя из теплопроводности сплошного материала η_0 : $\eta = \eta_0 s (R_d/R)^2$, где $s \approx 0,5$ – доля площади, занимаемой частицами в произвольном сечении пористого грунта (она равна их объемной доле). При типичных значениях теплопроводности $\eta_0 \approx 3 \cdot 10^5$ эрг·см⁻¹·с⁻¹·К⁻¹, $\eta \approx 20$ эрг·см⁻¹·с⁻¹·К⁻¹ и радиуса частиц лунного грунта $R = 3 \cdot 10^{-3}$ см получим $R_c \approx 1,1$ мкм.

Величина контакта может рассказать о его прочности и механизмах формирования. Под действием капиллярной силы в начальный момент происходит упругая деформация частиц и образуется контакт небольшой площади. Если бы рост контакта на этом прекратился, теплопроводность лунного грунта была бы в 5-8 раз меньше наблюдаемой. Контакт увеличивается под действием капиллярных напряжений на окружности, являющейся границей контактного круга. Вещество течет, заполняя и закругляя контактное острие (рис. 2.8.3), пока капиллярные напряжения α/r_c , которые в начальный момент обращались в бесконечность ($r_c = 0$), не станут меньше предела текучести. Именно такому, более широкому, контакту соответствует полученная выше оценка радиуса.

Пластическое течение в контакте занимает от долей секунды до часов; с падением напряжения оно сменяется вязким течением, которое происходит путем диффузии атомов, что на много порядков медленнее. Масштабы времени процессов на поверхности небесных тел – тысячи и миллионы лет, что может оказаться достаточным для проявления эффектов капиллярного течения твердого вещества. Одно из следствий такого течения мы рассмотрим ниже.

Почему на Луне мало мелких частиц? В лунном грунте наблюдается дефицит микронных и субмикронных частиц [18,19]. Одной из причин этого могут быть капиллярные эффекты. Оказывается, течение твердого вещества в контакте между частицами может приводить к «растеканию» мелких пылинок по поверхности более крупных частиц, когда от меньшей остается лишь бугорок. И вообще, течение вещества под действием капиллярных сил будет приводить к сглаживанию неровностей на поверхности реголитовых частиц и уменьшать их шероховатость.

Подобные явления наблюдались в лабораториях – при высоких температурах, чтобы уменьшить время экспериментов до нескольких дней или часов. Температура лунной поверхности близка к комнатной, однако масштаб времени процессов – тысячи и миллионы лет. Время увеличения радиуса кривизны от $r/2$ до r равно [20]: $\tau_{1/2} \approx (kT/\alpha D_s)(r/a)^4$, где k – постоянная Больцмана, $a \approx 2 \cdot 10^{-8}$ см – межатомное расстояние, D_s – коэффициент поверхностной диффузии. Поскольку $D_s \sim \exp(-U/kT)$, это обеспечивает резкое ускорение процесса с температурой T . Видно, что время $\tau_{1/2}$ сильно зависит и от r , что и дает резкий обрыв в распределении частиц по размерам. Так, при $D_s \approx 10^{-16}$ см²/с $\tau_{1/2}$ будет около 10^3 лет для радиуса кривизны 1000 ангстрем и около 10^7 лет для $r = 1$ мкм.

Можно ли шагать по лунному грунту? Этот вопрос весьма интересовал исследователей перед первыми полетами на Луну. Сейчас, когда мы знаем ответ, он кажется банальным. А до посадки космических аппаратов высказывались предположения, что, поскольку лунный грунт сильно измельчен микрометеоритной бомбардировкой, он может оказаться слишком рыхлым, и космический аппарат и астронавты будут проваливаться в него. Нужно было знать, достаточна ли прочность лунного грунта. Прочность грунта определяется

сцеплением между частицами, т. е. свойствами межчастичных контактов, о которых говорилось выше. Ее можно оценить как $\sigma_p \approx \alpha/R$. В эту оценку не вошли механические характеристики материала частиц, а только характеристики контакта. Для лунного реголита, где $\alpha \approx 10^3$ эрг/см², $R = 10^{-3} - 10^{-2}$ см, прочность оказывается порядка $10^5 - 10^6$ дин/см², что совпадает с результатами натурных и лабораторных измерений [21]. Таким образом, лунный грунт прочнее аналогичного земного; он не мог представлять опасности для астронавтов. Следует, однако, отметить, что измерения и оценки α для твердых тел начали проводиться в 1970-80 г.г. Так что к моменту запуска КА на Луну эти результаты не могли стать достоянием инженеров и геологов.

Легко ли поднять пыль на Луне? Прочность отдельных контактов между частицами и грунта в целом определяют не только технологические характеристики грунта, но и все явления, связанные с отрывом и выбросом частиц: перенос пыли вдоль поверхности Луны, а также потерю пылеобразного вещества в ударных процессах и даже формирование слоя реголита.

При образовании кратера остановка роста его размеров происходит, когда давление кратерообразующего течения станет меньше прочности грунта. Скорость вещества, выбрасываемого с краев таких кратеров (они называются прочностными), равна [22]: $v_{\min} \approx (\sigma_p/\rho)^{1/2}/2$, где σ_p и ρ – прочность и плотность материала поверхности. На краях кратера скорость выбросов минимальна (с чем и связано обозначение $v_{\min}$); с приближением к центру она возрастает по закону $1/r^3$ [23]. Доля выбросов, покидающих небесное тело, равна $v_{\min}/v_e$, где v_e – скорость убегания.

Как видно из формулы для $v_{\min}$, наибольшей скоростью обладают выбросы из сплошного твердого материала, обладающего наиболее высокой прочностью, – например, из микрократеров на поверхности частиц грунта. Для таких выбросов $v_{\min} \sim 100$ м/с, для кратеров в реголите $v_{\min} = 5 - 10$ м/с, т. е. даже для небольших астероидов (≤ 50 км) значительная часть их выбросов может возвращаться на поверхность небесного тела. Это способствует образованию слоя мелкого реголита на астероидах, в наличии которого длительное время сомневались, полагая, что все кратерные выбросы покидают малые астероиды.

Недостаток знаний о прочности порошкообразной среды породил некоторые заблуждения. Так, рассматривая кратерообразование на астероидах, полагают, что оно происходит в так называемом гравитационном режиме, то есть рост размера кратера останавливают силы гравитации. При этом прочностью реголита пренебрегают, полагая ее нулевой. Поскольку гравитация на астероидах мала, расчетные размеры кратеров получаются завышенными. Другое распространенное заблуждение состоит в переоценке роли силы тяжести как препятствия к подъему пыли под действием сейсмических или электрических сил. Легко показать, что для реголитовых частиц характерных размеров ($\sim 10 - 100$ микрон) их весом можно пренебречь по сравнению с капиллярными силами, прижимающими их к поверхности. В работе (Старухина, 2005) впервые сформулированы ограничения на электрический потенциал поверхности ϕ , с которой могут подниматься заряженные пылинки. Для пылинки размера r , поднимающейся с поверхности такой же частицы, $\phi > (F_c)^{1/2} = (2\pi r \Delta\alpha)^{1/2}$ единиц СГСЭ (1 единица СГСЭ = 300 вольт). Это означает, что при потенциалах в несколько вольт, которые по некоторым расчетам достигаются на освещенной стороне Луны, даже субмикронные пылевые частицы не могут подняться с поверхности. Это может происходить только на ночной стороне с потенциалами несколько десятков вольт. Поднятие мелкой пыли имеет отношение к проблеме свечения, наблюдавшегося в зоне лунного терминатора астронавтами.

Свирлы на Луне и Меркурии: модель образования

Свирлы (от английского «swirl» – завиток) на поверхности Луны и Меркурия – это образования размером до десятков и сотен километров, не связанные с рельефом (точнее, наложенные на местный рельеф) и выделяющиеся только оптическими характеристиками: альбедо, показателями цвета, наклоном фазовых кривых (Kreslavsky and Shkuratov, 2003), поляриметрическими параметрами (Shkuratov and Opanasenko, 1992), которые указывают на меньшую степень зрелости (Shkuratov et al., 2003a,b) [24-26] и отличие структуры поверхности свирлов. Свирлы имеют сложную форму, включающую изгибы и вихреобразные узоры (рис. 2.8.4), а увеличение оптического разрешения изображений усложняет картину, выявляя такие структуры все меньших масштабов (< 50 м).

Кроме оптических аномалий, в области свирлов были обнаружены магнитные особен-

ности [27, 28]. С космических аппаратов, пролетавших над лунной поверхностью на высотах 100, 33 и 18 км, над областями свирлов были зафиксированы магнитные поля сложной конфигурации величиной до десятков γ ($1\gamma = 1$ нанотесла). По мере снижения орбит, с которых проводились измерения, возрастала сложность структуры и величина магнитных полей. Таким образом, механизм образования свирлов должен объяснить сочетание наблюдаемых оптических и магнитных аномалий.

Гипотезы о происхождении свирлов были всесторонне проанализированы в работе (Starukhina and Shkuratov, 2004). Эти гипотезы можно представить в виде нескольких групп. Авторы «антиподальных» механизмов полагают, что низкая зрелость грунта, приводящая к наблюдаемым оптическим характеристикам свирлов, является результатом отклонения протонов солнечного ветра магнитными аномалиями [29], а сами магнитные аномалии – следствием фокусировки различных видов волн, огибающих поверхность планеты при крупном ударном событии в антиподальной области (см. ссылки в [27]). Обсуждались три механизма антиподального намагничивания: (1) сжатие и усиление межпланетного магнитного поля расширяющейся плазмой, образовавшейся при высокоскоростном ударе [30]; (2) ударное намагничивание пород при фокусировке сейсмической волны; (3) ударное намагничивание выбросами из антиподального кратера.

Эта группа гипотез уязвима в отношении как оптических, так и магнитных свойств свирлов. Как показано в работе [31], для отклонения значительной части протонов солнечного ветра магнитное поле на поверхности свирлов должно превосходить 1000γ , в то время как максимальные значения, измеренные на лунной поверхности экспедициями «Аполлон», составляют 300γ . Кроме того, протоны накапливаются в грунте столь быстро (примерно за 100 лет (Starukhina and Shkuratov, 2004)) по сравнению со временем экспозиции частиц (≈ 150 тысяч лет [32]), что уменьшение их потока даже на три порядка не снизит их концентрацию в поверхностных слоях реголитовых частиц. Более того, согласно некоторым оценкам концентрация водорода в области свирла Рейнер-гамма повышена по сравнению с окружающими районами.

Наиболее существенный аргумент против механизма магнитного экранирования – то, что протоны вообще не являются необходимыми для созревания грунта. Это следует из термодинамических соотношений [33], согласно которым отсутствие кислорода, характерное для безатмосферных тел, является достаточным условием для восстановления железа при нагревании вещества до ≈ 1000 К, которое имеет место при метеоритных ударах. Это соображение подтверждается лабораторными экспериментами, имитировавшими разогрев, плавление и испарение, происходящими при микрометеоритной бомбардировке. В опытах по лазерному облучению пироксена, оливина и других силикатных минералов, имеющих на лунной поверхности [34, 35], а также по субсолидусному (т. е. при температуре ниже точки плавления) восстановлению железа в пироксене, оливине [36], было получено потемнение и покраснение образцов, а также обнаружено образование наночастиц железа вблизи поверхностей частиц, характерные для зрелого грунта.

Наконец, самому известному из свирлов – образованию Рейнер-гамма – не соответствует никакой крупный кратер или ударный бассейн на противоположной стороне Луны (в антиподальной области), что требует разработки иных механизмов как намагничивания, так и формирования оптических свойств свирлов.

Другая группа гипотез связывает происхождение свирлов с прохождением сквозь лунный реголит (или вдоль него) газов кометной комы [37, 24-26]. Предполагалось, что прохождение кометной комы создает «ветер», который может поднять пыль, обнажая незрелый грунт. При этом ядро кометы должно было бы пройти по касательной вблизи поверхности планеты. В противном случае в области свирла находился бы крупный кратер, а расширение ударного пара оказало бы давление на реголит большее, чем давление газов комы, и стерло бы результат прохождения комы, если бы таковой имел место (Starukhina and Shkuratov, 2004). Однако даже предельно возможные давления газов комы $p = n_c \mu v^2 \approx 10^4$ дин/см² ($\mu = 3 \cdot 10^{-23}$ г – масса молекул воды), которые реализуются вблизи поверхности ядра, где плотность комы $n_c \approx 8 \cdot 10^{12}$ см⁻³ максимальна, при маловероятном сочетании экстремальных значений параметров прохождения кометы (на расстоянии около половины радиуса ядра со скоростью $v = 70$ км/с), не могут преодолеть силу слипания между реголитовыми частицами и поднять пыль (Старухина, 2000, Starukhina and Shkuratov, 2004).

При помощи кометной гипотезы делались также попытки понять происхождение

магнитных аномалий. Обычно их объясняют ударным намагничиванием пород при столкновении кометного ядра с поверхностью планеты в индуцированном магнитном поле кометы, сжатом с приближением ее к поверхности. От первоначальных значений 40–80 нТ поле при этом должно было увеличиться до 0,01–1 э, необходимых для получения остаточной намагниченности, измеренной для лунных пород. Однако эта модель недостаточно разработана количественно; кроме того, сжатие и усиление имеет место и для межпланетного магнитного поля вокруг метеоритных ударов, но отнюдь не все крупные молодые кратеры окружены магнитными аномалиями.

Модель образования свирлов, способная объяснить их наблюдаемые свойства, разработана в Харьковской обсерватории (Starukhina and Shkuratov, 2004, Starukhina, 2006, 2007). В этой модели предполагается, что свирл – это след падения метеорного роя – остатков кометного ядра или астероида, распавшегося незадолго до столкновения с поверхностью Луны или Меркурия. Такой метеорный рой «вспахивает» область падения, не оставляя заметных кратеров и обнажая незрелый грунт. Практически одновременное падение большого числа ударников поднимает огромное количество частиц пылевых выбросов из мелких кратеров, целиком лежащих в реголитовом слое. До того как осесть на поверхность, пылинки испытывают сотни столкновений между собой, то есть образуют среду, подобную газу, которую можно характеризовать кинематической вязкостью. Струи выбросов в таком «газе» могут иметь большие числа Рейнольдса и сопровождаться вихревыми потоками пылевых частиц, которые, оседая на поверхность, образуют вихревые структуры, характерные для свирлов.

В месте падения метеорного роя следует ожидать также магнитную аномалию (Старухина, 2006, 2007). Намагничивание поверхности будет происходить в сильном магнитном поле, возникающем за счет сжатия внешнего магнитного поля (межпланетного, как на Луне, или дипольного, как на Меркурии) одновременно расширяющимися облаками ударной плазмы. Расчеты зависимости магнитной индукции от высоты для такого намагничивания уже при умеренных значениях параметров модели дали хорошее совпадение с величинами поля, измеренными с орбит.

Поиск воды на безатмосферных телах

Поиски воды на безатмосферных космических телах представляют интерес как для понимания состава и эволюции этих тел, так и для осуществления длительных космических экспедиций. В 1998 году было объявлено об обнаружении воды на Луне [39], а несколькими годами ранее – на Меркурии [40] и на астероидах [41]. Однако все это были свидетельства, полученные в косвенных экспериментах. Рассмотрим, в какой мере можно доверять интерпретации результатов этих экспериментов и что могло привести к таким результатам (Starukhina, 2001).

Поиск других интерпретаций экспериментов по обнаружению воды на безатмосферных телах был связан с двумя обстоятельствами. Во-первых, необходимо было найти источники воды. Даже для астероидов тех типов, которые предположительно являются родительскими телами метеоритов, содержащих воду, связанную в гидросиликатах, эта проблема не проста, поскольку при метеоритной бомбардировке происходит разогрев поверхности до температур, заведомо превосходящих температуру дегидратации. Однако «воду» неожиданно обнаружили даже на нескольких астероидах, сложенных безводными силикатами (S и E типов), и даже M типа. Предполагается, что вода могла появиться на таких телах в результате столкновений с кометами, имеющими ледяные ядра [42–44].

Это могло произойти следующим образом. Часть испарившихся молекул, скорость которых превышала скорость убегания, покинула небесное тело, а «медленные» молекулы совершали хаотические баллистические прыжки («испарение-конденсация») по поверхности, пока не попадали в холодные ловушки, откуда уже не могли испариться. При этом неявно предполагалось, что лед будет покрыт кратерными выбросами быстрее, чем успеет улетучиться за счет испарения при микрометеоритных ударах.

Но главная проблема – это летучесть льда: в космическом вакууме он быстро испаряется. Давление насыщенных паров и скорость испарения экспоненциально зависят от температуры. Так, метровый слой льда может сохраняться в течение миллиарда лет лишь в областях, где температура никогда не превышала 100 К. Это постоянно затененные кратеры, которые занимают лишь часть приполярных районов Луны и Меркурия. Однако даже в таких кратерах вещество время от времени разогревается от метеоритных ударов меньших

масштабов. Между тем, если верить данным КА «Лунар Проспектор», «льдом» на Луне и Меркурии должны быть покрыты или обогащены не только полярные шапки, но и значительные площади в экваториальных районах, где температура может превышать 350 К.

Дело в том, что в настоящее время нет прямых свидетельств наличия воды на безатмосферных телах. Есть три типа наблюдений, нацеленных на поиски льда. Все они являются косвенными. Такие наблюдения допускают двоякую интерпретацию. Эти наблюдения и интерпретации сведены в таблице 1. Рассмотрим интерпретацию каждого из типов наблюдений.

Таблица 1

Три дистанционных метода обнаружения водяного льда на безатмосферных космических телах: альтернативная интерпретация результатов

Имплантация протонов солнечного ветра. Наиболее очевидным эффектом солнечного ветра является ионная имплантация – накопление атомов налетающих ионов (их заряд компенсируется потоком электронов) на средней глубине проникновения ионов. Очевидно, что такое накопление не может продолжаться бесконечно; по достижении насыщения оно сменяется десорбцией. Концентрация насыщения имплантированных атомов примерно равна половине концентрации атомов в частице-мишени $n_0 \approx 10^{23} \text{ см}^{-3}$. В отсутствие десорбции она достигается за геологически малые времена: $\tau_s \approx 0,5 n_0 h / j \approx 10^{10} \text{ с} \approx 300 \text{ лет}$, где $j = 0,6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ – средний поток солнечного ветра на поверхность вращающегося тела вблизи орбиты Земли, $h \approx 1000 \text{ ангстрем}$ – толщина имплантированного слоя. В полярных областях Луны время насыщения на два порядка больше, однако оно остается в несколько раз меньшим среднего времени экспозиции частицы грунта на лунной поверхности 150 тыс. лет [32].

Если бы в конце пробега протонов образовывались нейтральные атомы водорода, то из-за своей высокой подвижности они не могли бы накапливаться в частице-мишени до концентраций, превышающих растворимость в ней водорода. Растворимость газов в силикатах очень мала. Однако концентрация водорода и других атомов солнечного ветра в лунном грунте на много порядков превышает равновесную. (Интересно, что никто не удивился этому обстоятельству. Видимо, данные о растворимости газов в силикатах не были известны химикам, анализировавшим лунные образцы.)

Повышенное содержание имплантированных газов обеспечивается захватом атомов в ловушках, которыми являются радиационные дефекты. Это может быть как физический захват в потенциальную яму вблизи дефекта, так и химический захват – насыщение нарушенных химических связей в частице-мишени. В мишенях, содержащих кислород, при облучении протонами могут образовываться гидроксильные группы OH. Образование гидроксидов наблюдалось при моделировании действия солнечных космических лучей на силикатные стекла [45], а также в многочисленных экспериментах по имплантации водорода в оксиды. Различные оксиды (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) облучались ядрами водорода или дейтерия в широком диапазоне энергий [46–48]. При этом в максимуме профиля имплантации от 50% до 100% атомов кислорода мишени оказываются связанными в группы OH (или OD).

Такие группы, как и атомы в ловушках, значительно менее подвижны, чем атомы водорода, свободно перемещающиеся между ионами в кристалле или стекле. После прекращения облучения освобождаются лишь мелкие ловушки, а более глубокие продолжают удерживать атомы. Этим объясняется повышенное содержание газов в лунном грунте, которое в среднем лишь на порядок меньше по сравнению с насыщением.

Способность ловушки удерживать атомы пропорциональна $\exp(-U_c/kT)$, где T – температура, U_c – энергия связи (глубина ловушки). Она может составлять от нескольких

десятих до нескольких электронвольт ($1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг). Так, для атомов Н в гидроксильных группах ОН в облученном SiO_2 $U_c \approx 0,8$ эВ. Именно экспоненциальная зависимость подвижности атомов от T и U_c определяет наблюдаемые региональные вариации содержания водорода в лунном грунте. Зависимость от T определяет широтный тренд содержания водорода. Зависимость глубины ловушек U_c от материала поверхности делает возможными как пониженное содержание Н в некоторых кратерах полярных областей, так и «пятна» высокой концентрации Н в низкоширотных районах, наблюдавшиеся КА «Лунар Проспектор».

Единственным местом на Луне, где обнаружена действительно большая величина концентрации водорода $[\text{H}] = 1700 \text{ ppm} = 0,17 \text{ вес.}\%$, является постоянно затененные кратеры Шумейкера и Фаустини с предполагаемой постоянной температурой 100 К [49]. Эта концентрация на порядок превосходит $[\text{H}]$ в других полярных кратерах, где температура значительно превышает 100 К. Однако даже столь большая величина $[\text{H}]$ в принципе может быть объяснена имплантацией протонов солнечного ветра. Покажем это.

Массовая доля имплантированного водорода в грунте с удельной поверхностью S (площадь на единицу массы) равна $[\text{H}] = S m_p n_s = 6\xi m_p c n_0 h / \rho l$, где m_p – масса протона, $n_s = c n_0 h$ – число внедренных атомов на единицу поверхности реголитовой частицы, c – их доля в имплантированном слое толщины h . Типичное значение n_s при насыщении, достигаемом в лабораторных экспериментах, $n_s = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ [50]. Однако при космическом облучении эта величина может быть в несколько раз больше. Этому способствуют два фактора.

Во-первых, расширение профиля имплантации со временем. Дозы облучения солнечным ветром даже в полярных кратерах могут быть выше, чем в лабораториях, так что максимальные c будут достигаться в более широкой области профиля имплантации. Облучение происходит медленнее, поэтому внедренные ионы успевают диффундировать вглубь частиц. Измерение зависимости $[\text{H}]$ от глубины в частицах лунного грунта [51] показало, что максимумы профилей $[\text{H}]$ смещены до 1000 ангстрем вглубь, а ширина профилей составляет несколько тысяч ангстрем (т. е. на порядок больше средней ширины профилей протонов с энергией 1 кэВ в лабораторных экспериментах). Другая возможность увеличения n_s имеется для грунта полярных районов, где низкая температура частиц может воспрепятствовать десорбции имплантированных атомов настолько, что на глубине имплантации образуются газовые пузырьки, называемые блистерами.

Измеренные значения удельной поверхности лунного реголита S лежат в интервале от 800 $\text{см}^2/\text{г}$ [52] до 5000 $\text{см}^2/\text{г}$ [53]. Заметим, что удельная поверхность грунта связана со средними характеристиками частиц $S = 6\xi/\rho l$, где $\rho \approx 3 \text{ г/см}^3$ – плотность частиц грунта и l – их средний размер, ξ – фактор шероховатости (отношение площади поверхности частицы к площади сферы того же диаметра).

Учет этих обстоятельств показывает, что в лунном грунте могут быть достигнуты концентрации имплантированного водорода даже в несколько раз большие, чем максимальная концентрация 0,17 вес.%, измеренная нейтронным спектрометром КА «Лунар Проспектор».

Химическое связывание протонов солнечного ветра и инфракрасная спектроскопия астероидов. Поиски воды на астероидах проводились спектроскопическим методом. Молекулы воды дают несколько колебательных полос поглощения: около 6 мкм и несколько полос в интервале 2,7 – 3,1 микрон. Достаточно сильны их обертоны – 1,4 и 1,9 мкм. Из них только полосы 6, 1,9 и $\approx 3,03$ мкм соответствуют колебаниям, где участвует молекула H_2O как целое, – остальные полосы вблизи 3 мкм формируются колебаниями только гидроксильных групп ОН. Полосу 6 мкм трудно выделить на фоне теплового излучения, полоса 1,9 мкм при малом содержании воды довольно слабая, поэтому поиски воды или гидросиликатов велись в полосе около 3 мкм [54, 41].

Однако поглощение в этой полосе нельзя интерпретировать однозначно, особенно при низком спектральном разрешении. Во-первых, невозможно отличить молекулы H_2O от гидроксильных групп ОН. Более того, невозможно отличить гидратированные силикаты от безводных (и даже силикаты от других оксидов), так как группы ОН, как обсуждалось выше, могут быть результатом имплантации протонов солнечного ветра.

Можно ли обнаружить группы ОН радиационного происхождения при дистанционном зондировании безатмосферных тел? Достаточно ли их, чтобы повлиять на спектры отражения? Оказывается, да, – что подтвердили расчеты (Старухина, 1999, 2001) на основе модели (Старухина и Шкуратов, 1996). Физическая причина этого та же, что и изменения спектров порошков тонкими пленками сильно поглощающих веществ на поверхностях

прозрачных частиц. Приращение оптической толщины частицы грунта, окруженной каймой имплантированного слоя толщины h , равно: $\Delta\tau = 2\alpha n_s h = 2\alpha n_s$, где $\alpha = 3 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ – эффективность поглотителя (коэффициент поглощения на единицу объемной концентрации), а множитель 2 соответствует двукратному прохождению луча через кайму частицы между двумя рассеяниями на ее поверхности. При $n_s = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (см. выше) $\Delta\tau = 0,3$. Это значительная добавка к оптической плотности частиц. Для сравнения: силикатные частицы, составляющие материковые и морские районы Луны, при $\lambda = 2,6 \text{ мкм}$ имеют альбедо $A = 0,35$ и $0,17$ и $\tau = 0,085$ и $0,25$, а добавка $\Delta\tau = 0,3$ снижает альбедо до $0,12$ и $0,084$, соответственно.

Лед или холодные силикаты? О льде на полюсах Меркурия и Луны было объявлено после обнаружения их большой яркости в радиодиапазоне, а также большой «деполяризованной» компоненты отраженного сигнала. Все это указывало на значительный вклад в отраженный сигнал многократно рассеянных волн. На Земле такие характеристики отраженных радиоволн наблюдаются только на территориях, покрытых льдом. Отсюда был сделан вывод о присутствии льда у полюсов Меркурия и Луны.

На самом деле многократное рассеяние радиоволн свидетельствует лишь о низком коэффициенте их поглощения в рассеивающей среде. Коэффициент поглощения радиоволн диэлектриками уменьшается с температурой, и в постоянно затененных полярных областях Меркурия и Луны поглощение силикатами может снизиться до поглощения, характерного для льда. На Земле, обладающей атмосферой, высокое отражение радиоволн силикатами не может проявиться, во-первых, потому что достаточно низкие температуры не достигаются, во-вторых, все холодные области на Земле покрыты толщами льда.

Отсутствие измерений поглощения радиоволн при низких температурах позволяет подтвердить этот вывод лишь косвенно, путем экстраполяции измеренных температурных зависимостей поглощения для силикатов на низкие температуры (Starukhina, 2000, 2001).

Интерпретация высокой радиояркости полюсов Меркурия как «холодных силикатов» находится в соответствии с наблюдением радиоярких пятен в его низкоширотных зонах, где дневные температуры около 600°C , и такие пятна никак нельзя приписать воде. Поглощение радиоволн различными силикатами может варьировать в широких пределах и может быть достаточно низким даже при высоких температурах, что объясняет локальные вариации радиояркости. Ее глобальный ход, как и в случае с десорбцией имплантированных газов, определяется глобальным ходом температуры.

Распределение имплантированных газов по лунной поверхности

Изложенные выше соображения о глобальном (широтном) ходе распределения содержания водорода можно применить и к другим имплантированным газам, например, к изотопу гелия – ^3He , который является потенциальным энергоносителем будущего [55]. В связи с возможной добычей ^3He на Луне она была названа «Персидским заливом XXI века» [56].

Как и в случае водорода, рассматривались два фактора, которые могли бы влиять на концентрацию имплантированных атомов в лунном грунте: накопление и десорбция. В работе [57] по картографированию содержания гелия в лунном грунте учитывался лишь первый фактор. Средний поток солнечного ветра уменьшается с широтой ϕ по закону $\cos\phi$. Однако, как указано в работах (Шкуратов и др., 1999, Starukhina, 2006), определяющим фактором является не скорость накопления, а скорость дегазации. Медленная дегазация компенсирует падение потока с широтой: имплантированные атомы оказываются «вмороженными» в частицы грунта.

Кроме сказанного выше, в пользу этого свидетельствует тот факт, что измеренные концентрации имплантированных газов в лунном грунте отличаются от их концентраций в солнечном ветре (см. таблицу 2): чем меньше скорость диффузии и десорбции атомов, тем больше их доля возрастает по сравнению с долей в солнечном ветре.

Таблица 2.

Типичные доли атомов в солнечном ветре
и в лунном грунте (оценки по данным [58])

Сказанное в предыдущем параграфе об имплантированных газах относится и к гелию, а именно: (1) глобальный ход концентрации гелия контролируется температурой, и, следовательно, нужно ожидать возрастания [He] с широтой; (2) возможны локальные вариации [He], вызванные присутствием минералов, связывающих гелий в глубокие ловушки.

Захват атомов гелия – нетривиальный факт, поскольку они не могут связываться химически, а в силу малых размеров являются самыми подвижными из всех имплантированных атомов. Более эффективные ловушки для гелия содержат минералы с относительно высокой проводимостью – например, ильменит FeTiO_3 [59,60]. Поверхностный слой таких минералов не аморфизуется при бомбардировке солнечным ветром, а радиационные дефекты, образующиеся на фоне сохранившейся кристаллической структуры, связывают внедренные атомы гелия значительно сильнее, чем менее выраженные дефекты аморфной ионной сетки. Энергия связи гелия в таких ловушках-вакансиях порядка одного электрон-вольта и более, так что температура лунной поверхности даже на экваторе слишком низка для их термического освобождения. Очевидно, что для наличия большого числа радиационных дефектов необходима достаточная степень зрелости грунта, поэтому наблюдаемое содержание гелия коррелирует со зрелостью (см. раздел 2.1).

Отметим также, что типичные энергии связи имплантированных атомов в ловушках выше теплот испарения молекул летучих веществ (таких как H_2O , CO_2 и др.), поэтому температуры полярных районов Луны более благоприятны для накопления имплантированных газов, чем летучих веществ. Поэтому, если мы предполагаем присутствие в грунте замороженных летучих веществ, то там тем более следует ожидать повышенного содержания «вмороженных» имплантированных атомов.

Поскольку содержание имплантированных газов солнечного ветра в лунном грунте определяется скоростью дегазации, то наиболее перспективными для добычи таких газов являются полярные районы, особенно постоянно затененные кратеры, где предпочтительно отбирать зрелый грунт с высоким содержанием ильменита. Может быть, кратеры Шумейкер и Фаустини и есть будущий «Персидский залив»?

Таким образом, использование опыта, накопленного в области физики конденсированного состояния, может быть весьма полезным в планетной физике; он позволяет по-новому взглянуть на устоявшуюся интерпретацию некоторых результатов дистанционного зондирования Луны и планет.

Литература

1. *Wright R. B., Varma R., Gruen D. M.* Raman scattering and SEM studies of graphite and silicon carbide surface bombarded with protons, deuterons and helium ions. // *J. Nucl. Mater.* – 1976. – V. 63. – P. 415-421.
2. *Bibring J.-P.* Effets d'implantation du vent solaire dans les grains lunaires et extrapolations astrophysiques. These. Orsay, 1978. – 184 p.
3. *Roessler K., Eich G., Patnaik A., Zador E.* Polycyclic aromatic hydrocarbons via multicenter reactions induced by solar radiation // *LPSC XXI*, Houston TX: LPI. – 1990. – P.1035-1036.
4. *Hartmann W. K., Binzel R. P., Tholen D. J., Cruikshank D. P., Goguen J.* Trojan and Hilda asteroid lightcurves. I. Anomalous elongated shapes among Trojans (and Hildas?) // *Icarus.* – 1988. – V. 73. – P. 497-498.
5. *Dahlgren M., Lahulla J. F., Lagerkvist C.-I.* A study of Hilda asteroids. VI. Analysis of the lightcurve properties // *Icarus.* – 1999. – V. 138. – P. 259-266.

6. *Рот И.* Химическое распыление // Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 2. – М.: Мир, 1986. – С. 134-204.
7. *Philipps V., Vietzke E.* Reactions of thermal hydrogen atoms and energetic hydrogen and oxygen ions with pyrolytic graphite // Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Astrophysics / Eds.: Leger A., d'Hendecourt L., Boccarda N. – NATO ASI Series, Ser.C. – 1986. – V. 191. – P. 95-98.
8. *Leger A., and d'Hendecourt L.* Identification of PAHs in astronomical IR spectra - implications // Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Astrophysics / Eds.: Leger A., d'Hendecourt L., Boccarda N. – NATO ASI Series, Ser.C. – 1986. – V. 191. – P. 223-253.
9. *Пронин А. А., Николаева О. В.* Темные гало вокруг кратеров на Фобосе и ударное преобразование углистых хондритов // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 265. – С. 429.
10. *Pang K., Pollack J. D., Veverka J. et al.* The composition of Phobos: Evidence for carbonaceous chondrite surface spectral analysis // Science. – 1978. – V. 199. – P. 64-66.
11. *Ксанфомалити Л. В., Мороз В., Мерчи С., Брумт Д. и др.* (15 соавторов). Физические свойства реголита Фобоса // Космические исследования. – 1991. – Т. 29, вып. 4. – С. 621-646.
12. *Zellner B., Wells E. N.* Spectrophotometry of Martian satellites with the Hubble space telescope // LPSC XXV. Houston TX: LPI. – 1994. – P. 1541-1542.
13. *Виноградов Ф. П., Нефедов В. И., Урусов В. С. и др.* Рентгеноэлектронное исследование лунного реголита из Морей Изобилия и Спокойствия // Докл. АН СССР. – 1971. – Т. 201. – С. 957-960.
14. *Housley R., Grant R., Paton N. E.* Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates // Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. Houston TX: LPI. – 1973. – P. 2737- 2749.
15. *Gradie J., Veverka J.* The composition of the Trojan asteroids // Nature. – 1980. – V. 283. P. 840-842.
16. *King T.V.* Contribution towards a quantitative understanding of reflectance spectroscopy: phyllosilicates, olivine, and shocked materials. Ph. D. Thesis. Univ. of Hawaii. – 1986.
17. *Moroz L. V., Pieters C. M., Akhramova M. V.* Spectroscopy of solid carbonaceous materials: Implications for dark surfaces of outer belt asteroids // LPSC XXII, Houston TX: LPI. – 1991. – P. 925-926.
18. *Родэ О. Д., Иванов А. В., Назаров М. А. и др.* Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита. – Прага: Академия, 1979. – 235 с.
19. *Стахеев Ю. И., Вульфсон В. К., Иванов А. В., Флоренский К. П.* Гранулометрические характеристики лунного грунта из моря Изобилия // Лунный грунт из моря Изобилия. – М.: Наука, 1974. – С. 44-49.
20. *Гегузин Я. Е., Кагановский Ю. С.* Диффузионные процессы на поверхности кристалла. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
21. *Черкасов И. И., Шварев В. В.* Грунтоведение Луны. – М.: Наука, 1979. – 232 с.
22. *Ivanov B. A.* The effect of gravity on crater formation: thickness of ejecta and concentric basins // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. Houston TX: LPI – 1976. – P. 2947-2965.
23. *Melosh H. D.* Impact cratering: A geologic process. N.Y.: Oxford Univ. Press. – 1989. (Перевод: Мелosh Г. Образование ударных кратеров. Геологический процесс. – М.: Мир, 1994. – 335 с.)
24. *Bell J. F. Hawke B. R.* Recent comet impacts on the Moon: the evidence from remote-sensing studies // Publ. Astron.Soc. Pac. – 1987. – V. 99. – P. 862-867.
25. *Shevchenko V. V., Pinet P. C., Chevrel S. D.* Remote sensing studies of immature lunar soils (Reiner-Gamma Formation). Sol. Syst. Res. – 1993. – V. 27. – P. 310-321.
26. *Pinet P., Shevchenko V., Chevrel S., Daydou Y., Rosemberg C.* Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner Gamma formation: Optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data // J. Geophys. Res. – 2000. – V. 105. – P. 9457-9475.
27. *Lin R. P., Mitchell D. L., Curtis D. W., Anderson K. A., Carlson C. W., McFadden J., Acuña M. H., Hood L. L., Binder A. A.* Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from Lunar Prospector// Science. – 1998. – V. 281. – P. 1480-1484.
28. *Hood L. L., Zakharian A., Halekas J., Mitchell D. L., Lin R. P., Acuña M. H., Binder A. B.* Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using Lunar Prospector magnetometer data // J. Geophys. Res. – 2001. – V. 106. – P. 27825-27833 (2000JE001366).
29. *Hood L., Schubert G.* Lunar magnetic anomalies and surface optical properties // Science. – 1980. – V. 208. – P. 49-51.

30. Hood L. L., Huang Z. Formation of magnetic anomalies antipodal to lunar impact basins: Two-dimensional model calculation // J. Geophys. Res. – 1991. – V. 96. – P. 9837-9846.
31. Hood L., Williams C. The lunar swirls: Distribution and possible origins // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 20th. Houston TX: LPI. – 1989. – P. 99-113.
32. Borg J., Comstick G. M., Langevin Y., Maurette M., Jouffrey B., Jouret C. A Monte-Carlo model for the exposure history of lunar dust grains in the ancient solar wind // Earth Planet. Sci. Lett. – 1976. – V. 29. – P. 161-174.
33. O'Neill H. St. C. Systems Fe-O and Cu-O: Thermodynamic data for the equilibria Fe-“FeO”, Fe-Fe₃O₄, “FeO”-Fe₃O₄, Fe₃O₄-Fe₂O₃, Cu-Cu₂O, and Cu₂O-CuO from emf measurements // American Mineralogist. – 1988. – V. 73. – P. 470-486.
34. Moroz L. V., Fisenko A. V., Semjonova L. F., Pieters C. M., Korotaeva N. N. Optical effects of regolith processes on S-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrite and other mafic materials // Icarus. – 1996. – V. 122. – P. 366-382.
35. Sasaki S., Nakamura K., Hamabe Y., Kurahashi E., Hiroi T. Production of iron nanoparticles by laser irradiation in simulation of lunar-like space weathering // Nature. – 2001. – V. 410, N 6828. – P. 555-557.
36. Britt D. T. The spectral effects of subsolidus reduction of olivine and pyroxene // Lunar and Planetary Science XXIV. Houston TX: LPI. – 1993. – P. 195-196.
37. Schultz P., Srnka L. J. Cometary collisions on the Moon and Mercury // Nature. – 1980. – V. 284. P. 22-26.
38. Gold T., Soter S. Cometary impact and the magnetization of the Moon // Planet. Space Sci. – 1976. – V. 24. – P. 45-54.
39. Feldman W. C., Maurice S., Binder A. B., Barraclough B. L., Elphic R. C., Lawrence D. J. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: evidence for water ice at the lunar poles // Science. – 1998. – V. 281. – P. 1496-1500.
40. Butler B. J., Muhleman D. O. Mercury: Full-disk radar images and the detection and stability of ice at the north pole // J. Geoph. Res. – 1993. – V. 98. – P. 15003-15023.
41. Rivkin A. S., Howell E. S., Britt D. T., Lebovsky L. A., Nolan M. C., Branstor D. D. 3 μ m photometric survey of M- and E-class asteroids // Icarus. – 1995. – V. 117. – P. 90-100.
42. Watson K., Murray B. C., Brown H. The behavior of volatiles on the lunar surface // J. Geoph. Res. – 1961. – V. 66. – P. 3033-3045.
43. Arnold J. R. Ice I the lunar polar regions // J. Geoph. Res. – 1979. – V. 84. – P. 5659-5668.
44. Butler B. J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon // J. Geoph. Res. – 1997. – V. 102. – P. 19283-19291.
45. Zeller E. J., Ronca L. B., Levy P. W. Proton-induced hydroxyl formation on the lunar surface // J. Geophys. Res. – 1966. – V. 71. – P. 4855-4860.
46. Mattern P. L., Thomas G. J., Bauer W. Hydrogen and helium implantation in vitreous silica. // J. Vac. Sci. Technol. – 1976. – V. 13, No 1. – P. 430-436.
47. Gruen D. M., Siskind B., Wright R. B. Chemical implantation, isotopic trapping effects, and induced hydroscopicity resulting from 15 keV ion bombardment of sapphire. // J. Chem. Phys. – 1976. – V. 65, No 1. – P. 363-378.
48. Siskind B., Gruen D. M., Varma K. Chemical implantation of 10 keV H⁺ and D⁺ in rutile. // J. Vac. Sci. Technol. – 1977. – V. 14, No 1. – P. 537-542.
49. Feldman W. C., Maurice S., Lawrence D. J. et al. Evidence for water ice near the lunar poles // J. Geophys. Res. – 2001. – V. 106 (E10). P. 23231-23251.
50. Lord H. C. Hydrogen and helium implantation into olivine and enstatite: Retention coefficients, saturation concentrations, and temperature-release profiles // J. Geoph. Res. – 1968. – V. 73. – P. 5271-5280.
51. Leich D. A., Tombrello T. A., Burnett D. S. The depth of distribution of hydrogen in lunar material // Lunar Planet. Sci. Conf. 4-th. Houston TX: LPI. – 1973. – P. 463-465.
52. Grossman J. J., Mukherjee N. R., Ryan J. A. Microphysical, microchemical and adhesive properties of lunar material III: Gas interaction with lunar material // Proc. Lunar. Sci. Conf., 3d. Houston TX: LPI. – 1972. – P. 2259-2269.
53. Cadenhead D., Brown M., Rice D., Stetter J. Some surface area and porosity characterization of lunar soils // Proc. Lun. Sci. Conf. 8th. Houston TX: LPI. – 1977. – P. 1291-1303.
54. Lebovsky L. A., Jones T. D., Owensby P. D., Fierberg M. A., Consolmagno G. J. The nature of low albedo asteroids from 3- μ m spectrophotometry // Icarus. – 1990. – V. 83. – P. 12-26.
55. Wittenberg L., Santarius J., Kulchinski G. Lunar source of ³He for fusion power // Fusion

Technology. – 1986. – V. 10. – P. 167-178.

56. *Тейлор Л., Калсинский Дж.* Лунный Гелий-3 в термоядерной энергетике: Персидский залив XXI века // Астрон. вестн. – 1999. – Т. 33, №5. – С. 386-394.

57. *Johnson J., Swindle T., Lucey P.* Estimated solar wind-implanted helium-3 distribution on the Moon // Geophys. Res. Let. – 1999. – V. 26. – P. 385-388.

58. *Haskin L., Warren P.* Lunar chemistry // Lunar sourcebook. Eds. Heiken, G. H., Vaniman, D. T., French, B. M. N. Y.: Cambridge Univ. Press. – 1991. – P. 357-474.

59. *Eberhardt P., Geiss J., Graf H. et al.* Trapped solar wind noble gases, exposure age and K/Ar-age in Apollo 11 lunar fine material // Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf. Houston TX: LPI. – 1970. – P. 1037-1070.

60. *Taylor L. A.* Hydrogen, helium, and other solar-wind components in lunar soil: abundance and predictions // Engr., Constr., Oper. in Space II. ASCE Publ., Proc. of Space '90. – 1990. – P. 68-78.

2.9. ИСТОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЦА

д.ф.-м.н. Л. А. Акимов, И. Л. Белкина, Н. П. Дятел, Г. П. Марченко

Введение

Становление солнечной тематики в исследованиях обсерватории Харьковского университета связано с именами известных ученых. Это проф. Б. П. Герасимович, его аспирантка П. Г. Пархоменко и доктор физ.-мат. наук И. М. Гордон. Широкой популярностью в предвоенное время пользовалась первая в СССР монография Б. Г. Герасимовича «Физика Солнца», изданная в Харькове в 1933 г. на украинском языке, а затем переизданная в 1935 г. на русском языке. В монографии были широко представлены основные данные о Солнце, наблюдательные материалы о верхних и нижних слоях солнечной фотосферы и хромосферы, рассмотрены вопросы, связанные с методами астрофизических наблюдений Солнца. На основе общей теории переноса излучения и квантовой теории в ней изложены методы и результаты определения физических характеристик солнечной атмосферы. Другие разделы монографии Б. П. Герасимовича посвящены анализу механизмов и проявлений солнечно-земных связей, теории магнитных бурь, механике и физике корпускулярных потоков от Солнца. Нашли свое отражение также и результаты исследования периодичности солнечной деятельности, переменности солнечного вращения. Затронуты вопросы возможной переменности радиуса Солнца и солнечной постоянной.

П. Г. Пархоменко работала в нашей обсерватории с 1914 по 1939 г.г. Она известна своими теоретическими работами по переносу излучения в атмосфере Солнца, выполнила важную работу по нахождению коэффициентов поглощения солнечной атмосферы в разных длинах волн (Пархоменко, 1931, 1932).

И. М. Гордон работал старшим научным сотрудником Харьковской астрономической обсерватории в 1944 – 1946 г.г. и доцентом кафедры астрономии ХГУ в 1946 – 1949 г.г. В работе (Гордон, 1954) было впервые высказано предположение о том, что хромосферные вспышки (в то время их чаще называли «хромосферными извержениями») обуславливаются процессом ускорения корональных электронов в магнитном поле пятен до приобретения ими релятивистских скоростей и дальнейшего излучения этими электронами в магнитном поле пятна радиации во всем спектре. Сделанные И. М. Гордоном расчеты показали, что пучок электронов размером 5×10^9 см с концентрацией 250 см^{-3} , имеющих энергию 10^9 эв при напряженности магнитного поля в 50 гс, даст согласующееся с наблюдениями рентгеновское излучение ($\lambda \approx 1 \text{ нм}$). Эмиссия в хромосфере может быть следствием воздействия на нее корональных корпускул и квантов. Эта теоретическая работа получила в дальнейшем наблюдательные подтверждения.

Далее в отдельных разделах мы остановимся на основных направлениях работ по исследованию Солнца, которые проводились в астрономической обсерватории Харьковского университета, и отметим наиболее значительные результаты, полученные при их выполнении.

Наблюдения солнечной активности

Регулярные наблюдения различных проявлений солнечной активности в Харьковской обсерватории были начаты еще в 1893 г. проф. Г. В. Левицким и И. И. Сикорой. С 1893 по 1900 г. производились определения чисел Вольфа, положения пятен и протуберанцев. (Крисенко, 1950). В 1931 году наблюдения были возобновлены, и с 1933 г. Харьковская обсерватория начала принимать участие во всесоюзной Службе Солнца (СС). В 1935 году был введен в строй первый в Советском Союзе спектрогелиоскоп – спектрогелиограф (Барабашов и др., 1935). Инициатором и активным участником его создания был Н. П. Барабашов. Оптические и механические части прибора были изготовлены при участии известного ленинградского оптика Н. Г. Пономарева в мастерских обсерватории и Института метрологии. Первыми наблюдателями на новом инструменте в линии H_{α} водорода стали

Л. И. Крисенко и Б. Е. Семейкин. С 1 мая 1935 г. Астрономическая обсерватория ХГУ приступила к систематическим наблюдениям на новом инструменте по программам международной СС (Барабашев и др., 1935). Перерыв в наблюдениях был сделан только на время оккупации Харькова, но уже в 1944 году Л. И. Крисенко возобновила регулярные наблюдения солнечных пятен и флоккулов.

Спектрогелиоскоп – спектрогелиограф до настоящего времени является одним из самых универсальных инструментов для проведения работ по программам Службы Солнца. Его конструкция дает возможность вести практически непрерывные наблюдения за хромосферой Солнца как в центре линии H_{α} , так и в ее крыльях и получать изображения солнечного диска в любой фраунгоферовой линии спектра и в участках непрерывного спектра. Смещение в крылья линии H_{α} осуществляется с помощью *line – shifter* в течение нескольких секунд, поэтому измерения ширины линии с точностью до минуты относятся к одному моменту времени. Такие наблюдения в крыльях линии H_{α} дают возможность измерять лучевые скорости движущихся масс вещества, определять точное время начала активизаций стационарных образований и эруптивных процессов. При этом наблюдения не ограничиваются линией H_{α} , но могут производиться в любых линиях ближней ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областей солнечного спектра. Первые изображения Солнца в линии H и K Call в Харьковской обсерватории были получены Л. И. Крисенко в 1950 г. В том же году Л. И. Кассель сконструировал и изготовил специальный гидромотор для спектрогелиографа, который заменил применявшиеся ранее электрические моторы и устранил зубчатые колеса передач. Благодаря этому качество спектрогелиограмм значительно улучшилось. Регулярные наблюдения кальциевых флоккулов были начаты после реконструкции инструмента при подготовке к работам по программам Международного Геофизического Года (МГГ, 1957–1958 г.г.). В дальнейшем существенным прогрессом в наблюдениях в линии K_{232} Call послужило введение в строй фотоэлектрического прибора для настройки центра линии на щель, который сконструировал и изготовил Л. А. Акимов в 1964 году.

В 1973 году были начаты также регулярные кинематографические наблюдения на хромосферно-фотосферном телескопе АФР-2 с интерференционно-поляризационным фильтром ИПФ-4 в линии H_{α} . Инструмент был установлен на территории Чугуевской наблюдательной станции.

Программа МГГ была приурочена к годам максимальной активности в солнечном цикле №19. Успешная реализация программы МГГ послужила стимулом для проведения дальнейших международных комплексных программ исследования Солнца в различные периоды циклов: МГСС, ГСМ, Flare 22, ГСС... ИНУ. На решение отдельных проблем физики Солнца были направлены проведенные в разные годы наблюдательные кооперативные программы, в которых принимали участие солнечные обсерватории СССР и других социалистических стран – программы КАПГ (Комиссии академий наук социалистических стран по комплексной проблеме «Планетарные геофизические исследования»).

Астрономическая обсерватория Харьковского университета, являясь одной из станций международной сети Службы Солнца (СС) (№34501), принимала участие в проведении всех международных программ. В наблюдательных программах в разные годы участвовали такие научные сотрудники обсерватории: Л. И. Крисенко (руководитель СС до 1962 г.), В. А. Езерская (руководитель СС в 1962–1964 г.г.), Р. М. Чиркова, Н. П. Дятел (руководитель СС с 1964 г.), И. Л. Белкина (руководитель СС с 1996 г.), Т. П. Бушуева, Г. П. Марченко, Л. А. Цымбалюк.

Особое место в работе Харьковской СС занимали оперативные программы наблюдений солнечных вспышек и других геоэффективных процессов – программы академика А. Б. Северного. Программы обычно объявлялись во время пилотируемых космических полетов, результаты их использовались для прогнозов радиационной безопасности космонавтов. Во время программ Северного необходимо было проводить наблюдения весь световой день, оперативно обрабатывать полученные спектрогелиограммы и фотогелиограммы, определять гелиографические положения, баллы, площади и другие характеристики активных явлений. К концу дня все полученные данные кодировались и отправлялись телетайпом в центр прогнозирования радиационной безопасности (ИПГ, г. Москва). Успешное решение таких задач было бы невозможно без помощи лаборантов СС, обязанности которых в разные годы выполняли А. А. Макаровская, Л. Н. Мартыненко, О. И. Романенко, М. А. Хазан.

Новый этап в наблюдательных работах по солнечной активности был связан с созданием в нашей обсерватории универсального фотометра на основе охлаждаемой ПЗС-линейки. Прибор разработал и изготовил В. В. Корохин для наблюдений Луны и планет в

1989 г. С 1992 г. началось регулярное применение фотометра на спектрогелиографе для получения монохроматических цифровых изображений Солнца в линиях H_{α} , K_3 Call, а также в инфракрасной линии гелия $\lambda = 1083$ нм. Проведенные исследования оптических характеристик ПЗС-фотоприемника при работе в квазимонохроматическом режиме в видимой и ближней инфракрасной области выявили отдельные недостатки, связанные с конструктивными особенностями этого приемника. Были разработаны алгоритмы и создано программное обеспечение для устранения этих недостатков. С новым фотоприемником появилась возможность автоматизировать патрульные наблюдения, используя регистрацию изображений примерно каждые 5 минут. Использование цифровых изображений повысило точность определения гелиографических координат активных процессов, позволило быстро и точно определять их площади и интенсивности, а значит и легко оценивать мощность излучения вспышек в линии H_{α} , определяющую энергетику вспышки во всем диапазоне частот (Белкина и др., 1996). Созданное С. А. Белецким (2002) программное обеспечение позволило записывать изображения в цифровые файлы 512 x 600 пикселей в международном формате fits, повышать пространственное разрешение изображений, устранять потемнение изображений от центра к краю для выделения деталей вблизи солнечного лимба, определять координаты необходимых деталей. Все это наблюдатель может делать оперативно, непосредственно в процессе патруля. Таким образом, использование цифровых изображений Солнца в разных линиях позволило проводить патруль солнечной активности на современном техническом уровне. На рис. 2.9.1 приведены примеры изображений, полученных на АФР-2 с ИПФ-4 и на спектрогелиографе Харьковской обсерватории с помощью одномерного ПЗС-фотометра.

Дальнейшее совершенствование наблюдений Солнца направлено на исследование возможностей использования матричных ПЗС-фотоприемников для одновременного получения изображений Солнца в избранных линиях и в их окрестностях (Korokhin et al., 1999). Работы в этом направлении в НИИ астрономии ХНУ продолжаются до настоящего времени.

Необходимо отметить, что данные, полученные во время патрульных наблюдений солнечной активности, ежемесячно передаются в Мировые Центры Данных (МЦД-А Боулдер, Колорадо, США, МЦД-Б, Москва, Россия) и публикуются в международных журналах по солнечной активности: «Solar-Geophysical Data» и «Quarterly Bulletin on Solar activity». В 2000 г. в нашей обсерватории был создан Интернет-сайт KHASSM <http://www.cyteg.com/khassm/>, на котором регулярно выставляются изображения Солнца, получаемые в линиях H_{α} , K_3 Call, HeI.

Данные станции наблюдений НИИ астрономии ХНУ, полученные при проведении патрульных наблюдений солнечной активности, вместе с данными других обсерваторий используются многими исследователями для изучения солнечной цикличности, прогнозов солнечной активности и космической погоды.

Г. П. Марченко и Ю. И. Великодский (2002) создали сайт «Космическая погода» <http://sw.astron.kharkov.ua/>, на котором в режиме реального времени представляются оперативные данные по солнечной активности и состоянию околоземного космического пространства. Изображения в УФ и рентгеновской области спектра, временной ход потока излучения в диапазоне 0,1 – 0,8 нм, потока протонов на орбите Земли, текущие значения индекса геомагнитной возмущенности (K_p индекса) автоматически обновляются по данным со спутников SOHO, Yohkoh и др. Сайт «Космическая погода» пользуется большим спросом у пользователей Интернета, особенно у русскоязычных. Существует и англоязычная версия этого сайта.

Данные наблюдений отдельных явлений на Солнце были использованы для научных исследований. Ниже мы приводим некоторые наиболее значимые результаты исследований солнечной активности, полученные на собственном наблюдательном материале.

1. В результате изучения мощной вспышки балла 4в по фотогелиограммам, полученным на телескопе АФР-2 4 июля 1974 года в линии H_{α} , Белкина и др. (1977) построили световые кривые временного развития отдельных узлов мощной вспышки, определили полную энергию, выделенную вспышкой, и ее геофизические последствия.

2. Для понимания механизмов возникновения больших геоэффективных вспышек и местоположения источников их энерговыделения важно было установить, совпадают ли по своему пространственному расположению ядра вспышечного излучения в хромосфере с ядрами белого свечения этих вспышек на уровне фотосферы. Н. П. Дятел совместно с А. Н. Бабиным (КрАО) и М. А. Лившицем (ИЗМИРАН) изучили фотогелиограммы в линии H_{α} , полу-

ченные в Харьковской обсерватории и в КрАО во время развития вспышки 04.07.74 г., а также фотосферные изображения ядер белой эмиссии этой вспышки, полученные в обсерватории Дебрецен (Венгрия). Исследована связь излучения H_{α} -вспышки со свечением ядер непрерывного излучения этой вспышки, доказано близкое пространственное совпадение ядер непрерывной и H_{α} -эмиссии. Показано, что хромосферная вспышка связана с процессами в корональных петлях на высотах меньших 7000 км (Babin et al., 1985).

3. Т. П. Бушуевой изучены временные изменения асимметрии контура линии H_{α} во вспышках. Полученный ею результат об отсутствии преобладания красной или синей асимметрии в исследованных вспышках, о различной асимметрии разных деталей даже в одной и той же вспышке (Бушуева, 1983) был существенным в то время, поскольку свидетельствовал в пользу петельного строения вспышек.

4. В рамках программы КАПГ «Крупномасштабные поля и рождение активных областей» Т. П. Бушуева и Г. П. Марченко исследовали особенности развития группы пятен и хромосферных флоккулов в линиях H_{α} и K_{232} Call активной области СД №135 в июне 1984 г. Показано, что эта область возникла вблизи устойчивой границы фонового поля, не изменявшейся с предыдущего оборота. Рождение активной области не изменило эту границу, которая оставалась почти той же и в следующем обороте, несмотря на мощный выход нового магнитного потока и сопровождавшие его активные процессы в хромосфере Солнца (Бушуева и Марченко, 1986).

5. По ПЗС-изображениям, полученным в период 1995 – 1999 г.г. в синем и красном крыльях ($\pm 0,05$ нм) линии $HeI \lambda 1083$ нм, сотрудники НИИ астрономии определили средние интенсивности площадок экваториальных корональных дыр и униполярных невозмущенных участков хромосферы, по которым были оценены средние доплеровские смещения линии гелия. Для 105 площадок в корональных дырах получено $\Delta\lambda = -0,0032$ нм, а для площадок в невозмущенной хромосфере – $\Delta\lambda = -0,0012$ нм ($\sigma = 0,0002$). Статистически значимое различие между этими данными служит доводом в пользу того факта, что солнечный ветер из корональных дыр начинает ускоряться с хромосферных высот (Белкина и др., 2000). Учитывая, что в дырах есть элементы тонкой структуры с радиальными потоковыми скоростями ≈ 8 км/с, получено, что такие элементы занимают примерно 10% поверхности КД. Отмечена тенденция увеличения $\Delta\lambda$ вблизи максимума солнечной активности.

6. В результате обработки серии из 18 ПЗС-изображений Солнца в линии $HeI \lambda 1083$ нм, полученной 27 августа 1999 г. во время развития вспышки балла 2N/M5.5, Белкина и др. (2002) нашли, что эта вспышка в линии гелия проявилась только в поглощении. Авторы обнаружили, что изменение глубины инфракрасной гелиевой линии произошло еще до начала вспышки в линии H_{α} . Обнаружено, что наиболее существенные изменения глубины гелиевой линии происходили в участках активной области, расположенных вблизи линий раздела полярностей продольной составляющей фотосферного магнитного поля. Сопоставление гелиевых изображений с изображениями в мягком рентгене, полученными с КА «Yohkoh», выявило, что области повышенного гелиевого излучения располагаются в основном под вершинами или в основаниях корональных петель. Показано, что определяющую роль в возбуждении гелия во время вспышки играет корональное излучение.

Наблюдение солнечных затмений экспедициями АО ХГУ

Полные солнечные затмения позволяют более надежно изучать те слои атмосферы Солнца, наблюдению которых при внезатменных исследованиях препятствует рассеянный свет яркой фотосферы. В нашей Астрономической обсерватории всегда уделяли большое внимание наблюдению солнечных затмений. Харьковские астрономы принимали участие в наблюдениях полных затмений 1914, 1936, 1945, 1952, 1954, 1968, 1972, 1981, 1990 и 2006 г.г. Из них только в 1945 и 1990 годах наблюдения не состоялись из-за плохой погоды. Остальные экспедиции обсерватории успешно выполнили свои программы.

Природа отводит астрономам несколько минут для наблюдений солнечной короны и считанные секунды для наблюдения хромосферы. Поэтому участники экспедиций заранее планируют предстоящие работы и тщательно готовятся к ним. Кульминацией полных солнечных затмений является внезапно вспыхивающая корона. Вид сияющей короны с далеко простирающимися лучами производит большое впечатление. Однако далеко не всем наблюдателям из-за сверхплотного графика работы удастся взглянуть на корону в небе.

Первые экспедиции уделяли наибольшее внимание работам по изучению солнечной короны. В их число входят измерения яркости внутренней и внешней короны, поляризации, выявление структурных особенностей в короне и их движений, получение линейчатого и непрерывного спектров, радионаблюдений и др.

Впервые сотрудники астрономической обсерватории Харьковского университета снарядили экспедицию для наблюдения затмения 21 августа 1914 г. Экспедиция располагалась вблизи г. Геническа на Азовском море. В ее состав входили такие видные ученые, как директор обсерватории Л. О. Струве, сотрудники Б. А. Герасимович, Н. Н. Евдокимов, О. Л. Струве и студент университета И. А. Божко. Они получили снимки внутренней и внешней короны (рис. 2.9.2.). Были определены моменты контактов затмений.

Полное солнечное затмение 19 июня 1936 г. было примечательно тем, что происходило в чрезвычайно благоприятных условиях для наблюдений в Советском Союзе. Полоса полной фазы затмения проходила от Северного Кавказа до Японского моря. Большая протяженность полосы, удобные часы наблюдений, летний период, возможность выборов пунктов с благоприятными метеорологическими условиями – все это способствовало успешному проведению наблюдений. Была создана специальная комиссия АН СССР по подготовке и проведению наблюдений затмения. В эту комиссию вошли представители от многих астрономических обсерваторий и других научных учреждений. Председателем комиссии назначили проф. Б. П. Герасимовича, который в то время уже был директором Пулковской обсерватории. Впервые была разработана единая программа наблюдений, которую выполняли 14 экспедиций разных обсерваторий. Одной из важных задач было исследование изменений в короне на протяжении времени 2 часа 13 минут, за которое лунная тень пробегает территорию от западной границы полосы до восточной. Для решения этой задачи Ленинградский астрономический институт изготовил 7 стандартных коронографов с фокусным расстоянием 5 м и диаметром 110 мм. Один из этих коронографов получила АО ХГУ.

Харьковская экспедиция в составе начальника экспедиции проф. Н. П. Барабашова, проф. Н. Н. Евдокимова, научных сотрудников Б. С. Семейкина, В. А. Михайлова, аспирантов В. Х. Плужникова, А. И. Гарковенкова, В. Д. Фурдыло была направлена в район станции Белореченская Краснодарского края. В задачи экспедиции входили фотометрические исследования внутренней и средней короны в инфракрасных, зеленых и ультрафиолетовых лучах; фотографирование спектров короны на трехпризменном спектрографе, изготовленном в мастерской обсерватории оптиком М. М. Ивановым; получение снимков на стандартном коронографе для изучения изменений в короне и др. Хотя из-за облачности намеченная программа была выполнена не полностью, но в прорывах между облаками удалось получить хорошие снимки и спектры короны. По этим снимкам были определены распределения яркости в короне в разных спектральных диапазонах и распределение интенсивности в спектре короны в области 803 нм – 325 нм (Барабашов, 1937).

Научные программы экспедиций по наблюдению затмений 25 февраля 1952 г. и 30 июня 1954 г. также включали в себя получение распределения интегральной яркости во внутренней и средней короне, исследование непрерывного спектра короны и отдельных ярких корональных линий. Для уточнения теории движений Луны проводились также и определения моментов контактов. В состав экспедиции 1952 г. входили сотрудники обсерватории В. Х. Плужников (начальник экспедиции), Л. И. Крисенко, В. А. Федорец, Г. Р. Посошков, студенты И. К. Коваль и Ю. Ф. Сенчук. Наблюдали затмение в районе ст. Чиили Кзылординской области Казахской ССР. Экспедиция прошла успешно. На стандартном коронографе получено 8 фотографий короны и протуберанцев. Результаты их обработки опубликованы (Крисенко, 1954, Коваль, 1954, Федорец, 1954).

Экспедиция АО ХГУ по наблюдению затмения 30 июня 1954 г. расположила свое оборудование в п. Кобеляки Полтавской области. В состав экспедиции входили почти все сотрудники обсерватории – директор обсерватории проф. Н. П. Барабашов, зам. директора А. Т. Чекирда, сотрудники Л. И. Крисенко, В. А. Федорец, В. И. Езерский, В. А. Михайлов, К. Н. Кузьменко, Г. Р. Посошков, Л. И. Кассель, аспирант И. К. Коваль и 13 студентов. Руководил экспедицией В. Х. Плужников. Корону фотографировали на стандартном коронографе и на специально изготовленной шестикамерной установке с объективами диаметром 10 см и фокусным расстоянием 50 см. Спектры короны были получены на трехпризменном спектрографе. Результаты наблюдений были представлены в работах (Коваль, 1957, Федорец и др., 1958, Михайлов и др., 1958).

Начиная с затмения 22 сентября 1968 г., основными задачами программ экспедиций

Харьковской астрономической обсерватории по наблюдению полных солнечных затмений стало получение кинематографическим методом спектров фотосферы и хромосферы. Необходимость таких наблюдений была обусловлена тем, что самые внешние слои фотосферы и нижние слои хромосферы были к тому времени недостаточно изучены по внезатменным наблюдениям. Вблизи внутренних контактов затмения, после исчезновения фраунгоферова спектра, хромосфера начинает светиться в отдельных эмиссионных линиях. Поскольку хромосферные серпы очень узкие, то их спектр можно получать с помощью бесщелевого спектрографа. К затмению 1968 г. сотрудником обсерватории Л. А. Акимовым был рассчитан бесщелевой спектрограф, который был изготовлен в мастерской обсерватории механиками Л. В. Павленко и В. Л. Павленко. В подготовке оборудования экспедиции и в наблюдениях активное участие принимал и студент физфака В. А. Кришталь, который впоследствии работал научным сотрудником обсерватории.

В задачи экспедиции по наблюдению затмения 22.09.1968 г. входило проведение кинематографических наблюдений спектра хромосферы в участках вблизи линий $D_3 \text{ HeI}$, D_1 , $D_2 \text{ NaI}$, H и $K \text{ CaII}$ и др. Фотографирование спектров с помощью кинокамеры с частотой 18-20 кадров/с позволяло реализовать разрешение вдоль направления движения Луны ≈ 20 км. Впервые такой метод наблюдений был применен Р. А. Гуляевым [1]. Харьковская экспедиция располагалась вблизи поселка Есиль Целиноградской области (Казахстан). Руководителем экспедиции был Л. А. Акимов. В состав экспедиции входили научные сотрудники обсерватории И. Л. Белкина, В. И. Быстрицкий, Н. П. Дятел, В. И. Гаража, С. Р. Измайлов, механик Л. В. Павленко и 3 студента – В. А. Кришталь, В. А. Васильев и Т. Н. Мандрыка. После окончания университета В. А. Васильев успешно работал в РИ НАН Украины. Его кандидатская диссертация была посвящена модели корональных конденсаций, а наблюдательным материалом для модели послужили корональные конденсации короны 22.09.1968 г. (Быстрицкий и Васильев, 1972). Т. Н. Мандрыка после окончания университета заведует библиотекой обсерватории.

Во время затмения 22.09.1968 г. спектры хромосферы регистрировались с помощью кинокамеры «Конвас-автомат» с частотой от 8 до 16 кадров/сек. Момент и длительность экспозиции каждого снимка фиксировались на шлейфном осциллографе и были определены с точностью до 0,01 сек.

Для абсолютной привязки данных к интенсивности центра диска Солнца во время частных фаз затмения производились фотоэлектрические измерения поверхностной яркости солнечного диска в области спектра около 6500 ангстрем. Эти измерения дали возможность контролировать изменения прозрачности земной атмосферы во время наблюдений. Калибровка от центра Солнца проводилась с помощью дополнительной оптической системы объектив-щель-коллиматор.

Наблюдения прошли достаточно успешно. Хотя конечно и были всякого рода неожиданности, в частности, резко упало напряжение в сети. Лишь наличие надежного стабилизатора предотвратило остановку кинокамеры. Учитывая этот опыт, в последующих экспедициях питание кинокамер осуществлялось от аккумуляторов.

Солнечное затмение 10 июля 1972 г. наблюдалось на Чукотке и запомнилось участникам экспедиции своими трудностями. Но в то же время были получены серии снимков спектра хромосферы и короны прекрасного качества. Описание инструмента, методики наблюдений и стандартизации снимков приведено в работе Акимова и др. (1982). Экспедиция АО ХГУ в составе научных сотрудников обсерватории Л. А. Акимова (начальник экспедиции), И. Л. Белкиной, В. И. Быстрицкого, Н. П. Дятел и механика В. Л. Павленко прибыла со своим оборудованием самолетом из Москвы в г. Анадырь. По ходатайству городских властей порт Анадыря выделил баржу для доставки экспедиций на косу «Русская кошка» в Беринговом проливе. Именно там расположили свое оборудование экспедиции многих обсерваторий СССР. Почти все время, пока члены экспедиции готовились к наблюдениям, на косе стояла холодная и облачная погода. С трудом удалось установить и отладить инструмент. Только в день затмения с утра прояснилось и сразу же стало тепло. При этом тучи комаров облепили оборудование и наблюдателей. Однако с программой наблюдений экспедиция успешно справилась.

Сразу же после окончания наблюдений участникам экспедиции нужно было срочно собрать оборудование и погрузить на баржу. Ледовая обстановка у берега была очень тяжелой – по проливу с большой скоростью плыли льдины (была максимальная высота прилива). Экипажу баржи приходилось делать огромные усилия, чтобы на минуту пристать к

берегу. За это время сотрудникам, стоящим на берегу наготове, нужно было успеть забросить на баржу несколько ящиков с оборудованием. Потом баржа отплывала от берега, чтобы пропустить очередную льдину, и повторялось все сначала. В конце концов, оборудование и люди оказались на барже и к вечеру благополучно прибыли в порт Анадырь. Несмотря на все трудности, экспедиция закончилась благополучно.

Солнечное затмение 31 июля 1981 г., видимое на территории Советского Союза по всей полосе полной фазы, наблюдали многие советские и зарубежные экспедиции. Для выбора подходящего места наблюдений для харьковской экспедиции был командирован М. М. Поспергелис. Он обследовал ряд пунктов с разными климатическими условиями, от г. Камень-на-Оби в Сибири до поселков в Тургайской области в Казахской ССР. Выбранное им место на притоке реки Тургай вблизи пос. Амангельды оказалось очень хорошим как для наблюдений, так и для расположения экспедиции. Экспедицией руководил Л. А. Акимов. Она состояла из сотрудников обсерватории М. М. Поспергелиса, И. Л. Белкиной, Н. П. Дятел, Г. П. Марченко, О. М. Стародубцевой, фотографа Ю. А. Марьина, сотрудника ИРЭ АН УССР Ю. В. Корниенко. В наблюдениях затмения приняли участие также В. И. Беленко (Москва, ГАИШ) и сын начальника экспедиции Алексей, который успешно сфотографировал корону на телескопе с объективом «Таир-33». Программа экспедиции предусматривала: кинематографические наблюдения спектров хромосферы и фотосферы в участках с линиями $D_3\text{ HeI}$, D_1 , $D_2\text{ NaI}$, резонансных дублетов SrII , BaII на дифракционном спектрографе; участков спектра с линиями H_β и H_α на призменном спектрографе; фотографирование короны на цветную обратимую и негативную пленки с помощью МТО-1000 и телескопа с объективом диаметром 75 мм и фокусным расстоянием 75 см. Результаты по наблюдению короны опубликованы в работе (Марченко и Цымбалюк, 1984).

Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г. было благоприятным на большей части полосы полной фазы. Началось оно в Южной Америке и закончилось вблизи озера Байкал. Экспедиция НИИ астрономии для наблюдения затмения была отправлена на Горную астрономическую станцию Главной астрономической обсерватории РАН, расположенную вблизи Кисловодска в горах Карачаево-Черкесской автономной республики на высоте 2130 метров. Через эту станцию проходила полоса полной фазы затмения. Бессменным начальником экспедиции был Л. А. Акимов. В ее состав входили сотрудники И. Л. Белкина, Г. М. Марченко, Ю. И. Великодский, студент В. Кажанов и внук руководителя экспедиции, ученик 9-го класса Алексей, который во время затмения успешно провел наблюдения по программе исследования дневного астроклимата. Регистрация спектров хромосферы с линией $D_3\text{ HeI}$ впервые осуществлялась с помощью ПЗС-камеры. Наблюдения проводились вблизи третьего контакта на бесщелевом спектрографе, аналогичном описанному выше. Были также получены изображения короны с помощью цифровой камеры.

Основные результаты, полученные сотрудниками НИИ астрономии ХНУ по наблюдениям спектров хромосферы и фотосферы по материалам затмений 22 сентября 1968 г., 10 июля 1972 г. и 31 июля 1981 г., отражены в последующих разделах.

Структура и эмиссии солнечной хромосферы в линии $D_3\text{ HeI}$ по наблюдениям полных солнечных затмений

Линия $D_3\text{ HeI}$ (587,6 нм) как одна из наиболее интенсивных гелиевых линий, видимых на краю солнечного диска, наряду с инфракрасной линией 10830 нм вызывала особый интерес как у наблюдателей, так и у теоретиков.

Еще в 1935 г. Перепелкин и Мельников [2] впервые указали, что максимум свечения в линии D_3 расположен на высоте около 1300 км. Дальнейшие наблюдения, как во время, так и вне затмений [3,4] в целом подтвердили этот факт, обнаружив максимум излучения хромосферы в линии D_3 на высотах 1150 и 1500 км соответственно. Поскольку на высотах максимума температура хромосферы меньше той, которая необходима для возбуждения атомов гелия электронным ударом, появился ряд работ, объясняющих возбуждение гелия коротковолновым излучением короны, см., например, [1,5,6].

Экспедициями Харьковской обсерватории во время затмений в 1968, 1972, 1981 г.г. на бесщелевом спектрографе было получено большое количество снимков спектра хромосферы в линии D_3 гелия и фотосферы в окрестности этой линии с помощью кинокамеры «Конвас» со сверхвысоким разрешением по высоте (15 – 30 км вдоль направления движения Луны).

Хромосферные серпы для затмений 1968 г. и 1972 г. были профотометрированы в ряде точек солнечного лимба, соответствующих впадинам лунного лимба. Результаты обработки позволили уточнить ранее известные и выявить новые характерные особенности свечения гелия в нижней и средней хромосфере (Белкина и др., 1972, Livshits et al., 1976, Акимов и др., 1998). Оказалось, что положение и величина максимума свечения гелия для невозмущенной хромосферы зависят от широты. В то время как на широтах, больших 20° , основное излучение хромосферы в линии D_3 приходится на высоты 1500 – 1600 км, вблизи экватора максимум свечения наблюдается на высотах, меньших 1000 км. При этом величина максимального свечения экваториальной невозмущенной хромосферы превышает максимальное значение интенсивности хромосферы на широтах 20° – 40° более чем в два раза. Выявлено также наличие двух типов распределения интегральной яркости с высотой, существенно отличающихся градиентами интенсивности: в спокойной хромосфере градиент интенсивности меньше, чем в активных областях.

Другой особенностью свечения гелия в нижней и средней хромосфере, обнаруженной по материалам наблюдения затмений 1968 г. и 1972 г., является то, что наряду с максимумом излучения на высотах 1000 – 1500 км в активных областях и в слабо возмущенной хромосфере на высоте около 250 км, то есть фактически в области температурного минимума, наблюдается дополнительный максимум свечения. Некоторые внезатменные наблюдения также указывали на наличие свечения в нижней хромосфере. Предполагалось, что это явление обусловлено наложением по лучу зрения отдельных неоднородностей, принадлежащих более высоким слоям хромосферы. Поэтому в работах, посвященных механизмам возбуждения атомов гелия в хромосфере коротковолновым корональным излучением с $\lambda < 50,4$ нм, наличие гелиевой эмиссии в области температурного минимума в расчет не принималось. Однако регулярный характер близфотосферного свечения, обнаруженный Л. А. Акимовым, И. Л. Белкиной, Н. П. Дятел по наблюдениям затмений, дает основание считать это свечение реальным фактом. Для окончательного прояснения этого вопроса было решено обработать спектры вспышек затмения 1972 г. и 1981 г. с применением нового метода, дающего возможность получить полную картину свечения гелия в хромосфере в линии D_3 , а не только в отдельных точках солнечного лимба.

В 1992 г. Л. А. Акимовым был сконструирован и изготовлен быстродействующий микрофотометр на базе МФ-2 для фотометрии спектров с записью результатов измерений в память ЭВМ. На нем были измерены снимки, полученные экспедициями 1972 и 1981 года. Программный комплекс для обработки результатов измерений был разработан Белецким (2000).

Новая методика фотометрии спектрограмм солнечных затмений дала возможность получить карты распределения абсолютных значений яркости хромосферы в линии D_3 в зависимости от широты и высоты. Результаты обработки кинематографических наблюдений хромосферных серпов для восточного лимба затмения 1972 г. и западного лимба затмения 1981 г. представлены в работах (Akimov et al., 1999, Акимов и др., 2000, Акимов и др., 2002). Карта для восточного лимба затмения 1972 г., отображающая картину свечения гелия в хромосфере, приведена на рис. 2.9.3. Как хорошо видно из рисунка, свечение наблюдается в обособленных (типа облачных) образованиях, придающих изображению пятнистый характер. Эти образования, имея максимум концентрации вблизи 1400 км, наблюдаются до высот 3 – 4 тыс. км, а их вершины простираются до 6 тыс. км. Характерный размер эмиссионных образований для обоих затмений соответствует размеру супергрануляционной ячейки (20 – 30 тыс. км вдоль лимба). В экваториальной зоне – зоне повышенной эмиссии присутствует свечение вблизи фотосферы с максимумом на высоте 250 км. Оно отделено полосой ослабленного излучения от структур верхнего максимума, приходящегося на высоту 1400 км. Протяженность хромосферы на высоких широтах больше, чем на низких.

На рис. 2.9.4 представлено распределение интегрального излучения хромосферы вдоль широты для затмений 1972 и 1981 г.г., выраженное в абсолютных единицах. Абсолютная привязка осуществлялась по методике, одинаковой для обоих затмений. Обе кривые показывают, что излучение в активных и спокойных широтах различается в два раза. Средняя яркость невозмущенной хромосферы в 1981 г. в два раза выше, чем яркость невозмущенной хромосферы 1972 г. Учитывая, что 1972 г. и 1981 г. отвечают разным стадиям цикла солнечной активности (среднемесячные числа Вольфа 76,5 и 151,3 для 1972 и 1981 г.г. соответственно), можно заключить, что интегральная яркость невозмущенной хромосферы увеличивается от минимума к максимуму солнечной активности.

Как показано в статье Сомова и Козловой [7], интенсивность линии HeI 1083 нм при переходе от минимума к максимуму цикла также увеличивается в два раза. Акимов и др. (2002) показали, что на высотах, больших 2000 км, гелиевое излучение в активных областях становится меньше, чем в спокойных и слабо возмущенных местах солнечного лимба. Излучение на высоте 3000 км в спокойных широтах втрое превышает излучение в активных областях, т.е. наблюдается антикорреляция с интенсивностью излучения короны. Это означает, что хромосфера в активных областях как бы прижата к фотосфере, что можно связать с различием значений и конфигурации магнитных полей в спокойной и слегка возмущенной хромосфере и в активных областях.

На рис. 2.9.5 представлена зависимость интенсивности излучения в линии гелия от высоты, проинтегрированного по всем широтам, для обоих затмений. Интенсивности верхних максимумов для обоих затмений различаются в 2,2 раза, а средняя энергия всей хромосферы – вдвое. Здесь наблюдается корреляция с числом Вольфа. На высотах > 2500 км наблюдается экспоненциальный спад интенсивности для обоих затмений, но с разным градиентом. Градиент изменения яркости после максимума в 4 раза больше для затмения 1981 г., так что на высотах > 3500 км интенсивность эмиссии в 1972 г. несколько выше, чем в 1981 г. То есть протяженность гелиевой хромосферы больше в 1972 г., чем в 1981 г.

Для обоих затмений в усредненной картине уверенно проявляется нижний максимум, расположенный вблизи фотосферы на высотах 200 – 300 км, т. е. в области температурного минимума. Нижний максимум является реальным. В принципе нельзя отрицать, что отдельные близфотосферные структуры могут быть следствием наложения по лучу зрения излучения от более высоко расположенных образований. Однако протяженность по высоте у близфотосферных структур, как правило, меньше, чем у структур верхнего максимума, и они отделены от эмиссии в средней хромосфере полосой ослабленного излучения. Поэтому присутствие нижнего максимума в интегральной характеристике исключает его интерпретацию случайным наложением по лучу зрения структур верхнего максимума. Отношение энергии верхнего к энергии нижнего максимумов равно 5 и 11 для затмений 1972 и 1981 г.г., соответственно. Как показано в работе (Акимов и др., 2002), свечение гелия в области температурного минимума, также как и свечение гелия в средней хромосфере, может быть объяснено радиацией из короны, проникающей до основания хромосферы. Однако для этого требуется рентгеновское излучение с $\lambda < 6$ нм.

В таблице 1 приведены оценки проникновения коронального излучения в хромосферу Солнца для различных длин волн, которые были выбраны из следующих соображений. Квант с $\lambda = 50,4$ нм однократно ионизирует атом гелия; излучение $\lambda = 30,4$ нм (линия Лайман-альфа гелия) является самым интенсивным в области длин волн <50 нм, оно активно участвует в ионизации гелия; фотон с $\lambda = 22,8$ нм соответствует пределу серии Лаймана гелия; в окрестности $\lambda = 9,1$ нм располагается область минимума коронального излучения, а вблизи 1,5 нм – область максимума рентгеновского излучения короны, где проявляется тепловое излучение корональных конденсаций и излучение в линиях FeXVII и OVIII.

Таблица 1

Коэффициенты атомного поглощения и высоты, до которых может проникнуть корональное излучение с разными длинами волн

λ , нм	α_H , см ²	α_{He} , см ²	α_{Σ} , см ²	h, км	h(0.3), км	h(0.1), км
504	$2.42 \cdot 10^{-18}$	$7.60 \cdot 10^{-18}$	$2.88 \cdot 10^{-18}$	2180	1680	1300
304	$2.92 \cdot 10^{-19}$	$2.76 \cdot 10^{-18}$	$5.14 \cdot 10^{-19}$	1440	1200	1020
228	$1.23 \cdot 10^{-19}$	$1.55 \cdot 10^{-18}$	$2.52 \cdot 10^{-19}$	1270	1090	930

8						
9	$7.90 \cdot 10^{-21}$	$2.47 \cdot 10^{-19}$	$2.94 \cdot 10^{-20}$	950	810	640
1						
3	$2.82 \cdot 10^{-22}$	$2.69 \cdot 10^{-20}$	$2.68 \cdot 10^{-21}$	650	520	350
0						
1	$3.50 \cdot 10^{-23}$	$6.73 \cdot 10^{-21}$	$6.38 \cdot 10^{-22}$	470	330	240
5						

При расчетах использовались значения коэффициентов атомного поглощения излучения α , приведенные в [8]. Для водорода $\alpha_H(\text{см}^2) = 7,9 \cdot 10^{-18} \cdot (\lambda/\lambda_1)^3$, где $\lambda_1 = 91,2$ нм. Для атомов гелия за границей его серии Лаймана имеем: $\alpha_{He}(\text{см}^2) = 7,6 \cdot 10^{-18} \cdot (\lambda/\lambda_2)^2$, где $\lambda_2 = 50,4$ нм. Суммарный коэффициент атомного поглощения атмосферы с учетом того, что атомов гелия в 10 раз меньше, чем атомов водорода, будет: $\alpha_\Sigma = 0,91\alpha_H + 0,09\alpha_{He}$. Оптическая глубина, на которую проникнет фотон при движении вдоль радиуса, $\tau = \alpha_\Sigma N(h)$, где $N(h)$ – полное число атомов над фиксированным уровнем h в атмосфере.

Анализируя представленные в таблице результаты, можно сделать вывод, что для излучения с $\lambda = 50,4$ нм основным поглотителем фотонов является водород. Он поглощает в 3 раза больше фотонов, чем гелий. Для длин волн 30,4 и 22,8 нм водород и гелий выступают равноправными поглотителями. Для $\lambda < 10$ нм гелий поглощает большую часть излучения, а на $\lambda = 1,5$ нм гелий поглощает в 20 раз эффективнее, чем водород. В пятом столбце таблицы представлены высоты h , до которых доходит около 40 % излучения короны для однородной модели хромосферы. На этой высоте оптическая толщина для коронального излучения $\tau = \alpha_\Sigma N(h) = 1$. Значения h отсчитываются от основания хромосферы. Следует заметить, что основная масса энергичных фотонов сосредоточена в области от 40 до 20 нм [9]. Эти фотоны формируют верхний максимум излучения в линии D₃. Рентгеновское излучение на этих высотах практически не поглощается.

Известно, что хромосфера весьма неоднородна. Размер неоднородностей меняется в широких пределах – от размера супергранул до тонких трубок диаметром около 40 км. Наличие мелкомасштабных неоднородностей следует, в частности, из измерений соотношения интенсивностей компонентов триплета инфракрасной линии гелия λ 1083 нм [7]. Глубина линии мала – около 2 процентов от интенсивности континуума. Для малой оптической толщины поглощающего слоя сумма интенсивностей двух более длинноволновых компонентов триплета, имеющих почти одну и ту же длину волны, в 8 раз больше интенсивности третьего. Однако результаты многочисленных измерений отношений центральных глубин сильного и слабого компонентов для спокойных и возмущенных областей на разных расстояниях от центра диска показали, что по отношению центральных глубин компонентов оптическая толщина сильного компонента меняется от 0,7 до 2,5, что свидетельствует о значительном самопоглощении в линии, соответствующем большой оптической толщине. Противоречие можно устранить, если предположить, что излучение формируется в плотных образованиях, покрывающих малую часть видимой площади хромосферы.

С учетом этого обстоятельства можно рассчитать глубины проникновения коронального излучения при различных значениях фактора заполнения видимой площади излучающими элементами. В двух последних столбцах таблицы 3.1 приведены результаты вычисления глубины проникновения излучения для фактора заполнения 0,3 и 0,1, которые показывают, что в неоднородной хромосфере с такими факторами заполнения площади излучающими элементами рентгеновское излучение проникает в область температурного минимума.

Для спокойного Солнца (Иванов-Холодный и др., 1966) энергия излучения для волн короче 6 нм составляет около 5 процентов от количества энергии за пределом серии Лаймана для гелия [10]. В годы максимума средняя энергия коротковолнового излучения возрастает: для $\lambda < 40$ нм в 1,5-2 раза, $\lambda < 6$ нм – в 5 раз, а для $\lambda < 2$ нм – в 15 раз. Для активных областей с высокотемпературными корональными конденсациями последняя величина может меняться в десятки раз.

Таким образом, проведенные харьковскими солнечниками оценки показали, что рентге-

новское излучение короны с $\lambda < 6$ нм проникает в нижние слои хромосферы, чему способствует весьма неоднородный характер строения хромосферы и возможность прохождения энергичных квантов между сгустками хромосферной плазмы. Наблюдательные данные подтвердили предположение об определяющей роли коронального излучения в появлении нижнего максимума в высотном распределении гелиевой эмиссии. Так, нижний максимум гелиевого излучения проявляется преимущественно в активных областях, его величина, как и интенсивность излучения короны в рентгеновской области спектра, существенно варьирует в зависимости от фазы цикла солнечной активности. Ослабление гелиевого излучения на высотах между верхним и нижним максимумами, Акимов и др. (2003) объяснили дефицитом ионизирующего коронального излучения в области длин волн 6-17 нм.

Исследование яркости фотосферы и факелов на краю солнечного диска. Структурная модель факела

Распределение яркости фотосферы по диску Солнца изучалось многими наблюдателями и измерено с высокой точностью до расстояний ≈ 1500 км от края. Оно хорошо описывается теоретическими моделями. Распределение яркости на самом краю диска можно получить, измеряя временной ход интегральной яркости участка фотосферы, возвышающегося над лунным лимбом, во время полных солнечных затмений. Таким способом были вычислены абсолютные значения поверхностной яркости в зависимости от высоты для различных точек солнечного лимба по сериям снимков спектра вблизи линии D_3 гелия, полученным экспедициями Харьковской астрономической обсерватории в 1968, 1972 и 1981 г.

Среднее распределение поверхностной яркости в невозмущенной фотосфере для каждого затмения было получено путем усреднения кривых поверхностной яркости в 6-8 точках. Эти точки располагались в центре четок Бейли, соответствующих протяженным впадинам на лимбе Луны. Все средние кривые потемнения вблизи лимба показывают небольшое (3-9 %) увеличение яркости на расстоянии 300 – 600 км от края. Хотя измерения проводились только в невозмущенных участках фотосферы на лимбе, градиент яркости вблизи нуля для западных более «активных» лимбов 1968 и 1981 г.г. оказался в 1,4 раза ниже, чем для более «спокойных» восточных лимбов 1972 и 1981 г.г. (Акимов и др., 1990).

Изучено влияние искажающих факторов, которые могли вызвать обнаруженное увеличение яркости фотосферы вблизи лимба при наблюдениях с небольшими телескопами (апертура 10 см). Такими факторами являются небольшие размеры и характер рельефа впадин на лунном лимбе, а также мерцания света от источников с малыми угловыми размерами. В работах Белкиной и др. (1990), Акимова и др. (1992) показано, что размер четок, в которых производилась фотометрия спектров, достаточно велик и искажающие факторы не могут быть причиной уярчения фотосферы вблизи лимба.

По измерениям, выполненным во время затмения 1972 г., Акимов и др. (1982) получили довольно тесную корреляцию яркости фотосферы на лимбе со степенью активности исследуемых областей в хромосфере. Однако измерения и сопоставление яркости с активностью областей на лимбе, проведенные для затмения 1981 г., не обнаружили столь тесной корреляции, хотя активность на лимбе в затмение 1981 г. была существенно выше, чем в затмение 1972 г. Некоторые участки лимба с мощными активными областями при сравнении со спокойными областями не показали увеличения яркости фотосферы, заметно превышающего ошибки измерений. Для объяснения этого факта было выдвинуто предположение, что факелы разной мощности или структуры имеют разный ход яркости по диску и достигают максимального контраста на различных расстояниях от диска.

Однако опубликованные данные, подробный анализ которых проведен Акимовым и др. (1987), представляют весьма разнородную картину. Контраст факелов меняется в широких пределах, достигая наибольшего значения 1,6. У большинства авторов контраст максимален на каком-то расстоянии от центра диска, а на краю наблюдается резкий спад. У других отмечается рост контрастов до самого края. В связи с этим возникла необходимость провести дополнительно исследование хода контрастов факелов по диску, особенно вблизи края, обращая особое внимание на слабые и малозаметные структуры.

Наблюдения фотосферы проводились в зеленой области спектра ($\lambda_{эфф} = 0,54$ мкм) в 28-м эквивалентном фокусе телескопа АЗТ-8 с кольцевой диафрагмой диаметром 50 см и шириной 5 см, установленной перед зеркалом телескопа (Акимов и др., 1987). Для фотографирования использовались высококонтрастные пластинки FO-6 ORWO. Наблюдательный материал был получен с 12 по 30 июня 1984 г. Для обработки были выбраны 9 лучших

снимков с факелами, расположенными как можно ближе к краю. На рис. 2.9.6 представлен один из обработанных снимков среднего качества, интересный тем, что на нем видно большое количество факельных волокон вблизи самого лимба. Этот снимок получен в результате специальной обработки с устранением падения яркости фотосферы к краю.

При фотометрии снимков круглая диафрагма вырезала на Солнце участок около двух квадратных секунд дуги. Измерения проводились для всех факелов, яркость которых превышала яркость невозмущенной фотосферы на 3%. Всего проведено 582 измерения. Средняя кривая контраста факелов по измерениям на снимках с высоким пространственным разрешением свидетельствует о росте контрастов на краю диска.

Для того чтобы проследить эволюцию яркости факельных волокон разной интенсивности при их перемещении по видимому диску Солнца, были обработаны два снимка западного лимба в окрестности активной области. Анализ показал, что все факелы, яркость которых не более чем на 9% превышала яркость фотосферы на утреннем снимке, увеличили свой контраст спустя 10 часов при движении к лимбу. У всех факелов, яркость которых более чем на 18% превышала яркость фотосферы, контраст уменьшился. На рис. 2.9.7 приведены результаты этого исследования. Сплошные векторы характеризуют эволюцию ярких факелов, контраст которых был выше среднего на первом снимке, а пунктирные – слабых. Цифры у векторов – число факелов в группе, по которым проведено усреднение. Мы видим, что контраст слабых факелов, как правило, увеличивается при приближении к лимбу, а ярких уменьшается, если $\cos\theta$ меньше 0,35, где θ – угловое расстояние от центра диска.

Таким образом, предположение о различном поведении контрастов отличающихся по мощности факелов вблизи края подтвердилось. Эти данные позволяют согласовать на первый взгляд противоречивые наблюдения разных авторов.

Явление факела связано с магнитным полем умеренной интенсивности. Умеренной в среднем, поскольку в атмосфере, занятой факелами, могут встречаться объемы, где концентрация поля в несколько раз выше среднего значения, и объемы, лишенные поля. На уровне оптической глубины $\tau = 0,1 - 0,3$ энергия поля сравнима с энергией конвективного движения в гранулах. В этом случае поле является мощным фактором, преобразующим энергию турбулентного и направленного макроскопического потока плазмы в энергию хаотического теплового движения. Направленный поток плазмы сохранит импульс вдоль поля. Движение поперек направления поля будет испытывать вязкое торможение, что приведет к повышению температуры и плотности плазмы у границ поля. Дальнейшая тепловая диффузия приводит к размытию этой конденсации. Однако скорость диффузии вдоль поля выше, чем поперек, что совместно с условием сохранения составляющей макроскопического импульса вдоль поля способствует значительному подъему плазмы в верхние слои атмосферы, если поле направлено вдоль радиуса Солнца.

Такую ситуацию можно промоделировать сдвигом вдоль радиуса Солнца соседних участков фотосферы друг относительно друга на величину $\Delta\tau$ по оптической глубине. При расчетах предполагалось, что структура одномерная и периодическая, $d1$ – ширина поднятого элемента, $d2$ – ширина опущенного. Для зеленой области функция источника взята в виде $J(\tau) = 0,31 + 0,93\tau - 0,24\tau^2$. А связь между геометрической и оптической глубиной задавалась эмпирическим соотношением $\tau = 0,0045 \exp(-0,0183h)$, где h выражена в километрах.

Результаты расчетов контрастов показали, что при одинаковом сдвиге по глубине контраст слабо зависит от ширины неоднородностей в диапазоне от 25 до 200 км при $d1 = d2$. Мощным факелам лучше всего удовлетворяет сдвиг по τ 0,6 – 0,8 при $d1 = d2$. Для них максимум контраста наступает при $\cos\theta = 0,2$ и падает до нуля на лимбе. При уменьшении $\Delta\tau$ максимум сдвигается к лимбу, а его величина уменьшается почти пропорционально величине сдвига. При увеличении скважности структуры (увеличение ширины опущенного элемента при неизменной ширине поднятого) контраст уменьшается вдали от лимба, но увеличивается с приближением к лимбу и сдвигается к краю диска (рис. 2.9.8).

Небольшой всплеск яркости и изменение градиента кривых невозмущенной фотосферы вблизи лимба авторы (Акимов и др., 1988) также объяснили в рамках структурной модели факела, предполагая существование структур на краю диска.

Таким образом, предложенная структурная модель факела удовлетворительно описывает наблюдаемое поведение контраста факельных структур. Эта модель не противоречит и измерениям высоты фотосферы по затменным данным, приведенным в работах Акимова и др. (1984, 1993, 1994). В этих работах было обнаружено, что в активных областях, как правило, граница лимба расположена выше, чем в спокойных. Акимов и др. (1994) показали, что если поверхность с одинаковой плотностью в атмосфере Солнца описывается некоторой

средней сферой с отклонениями, распределенными по нормальному закону, то высота лимба неоднородной фотосферы возрастет на величину $\sigma^2/2H$. Здесь σ – среднеквадратичная величина отклонения поверхности от сферы, а H – шкала высот солнечной атмосферы.

Изучение турбулентности в нижней и средней хромосфере по затменным данным

Явление турбулентности солнечной хромосферы частично обусловлено макроскопическими движениями, имеющими основание в конвективной зоне, частично – прохождением упорядоченных волн. В нижней хромосфере, до высот ≈ 1500 км, из-за существенной плотности вещества и переналожения по лучу зрения, выделение отдельных структурных элементов затруднительно, поэтому для таких высот определяют обычно только среднюю скорость нетепловых движений V_t . Для определения V_t на высотах ≥ 2000 км возможно использование спектральных наблюдений на внезатменных коронографах. На меньших высотах из-за атмосферного замытия определение V_t более надежно по наблюдениям во время затмений. Данные о значениях V_t в хромосфере до 90-х годов прошлого столетия были противоречивы. Одни авторы [11] получили по своим данным резкий рост V_t от значений порядка 3 км/с в основании хромосферы, до 10 км/с на высоте 1500 км. По другим данным [12] турбулентная скорость атомов большинства элементов является низкой и на высоте 2000 км не превышает 5 км/с.

Лэндмэн [13] по спектрам хромосферы, полученным во время затмения, для высот ≈ 1500 км определил разные значения V_t для атомов NaI (≈ 5 км/с) и для ионов тяжелых элементов SrII и BaII (≈ 11 км/с). Следует отметить, что ионы тяжелых элементов являются хорошими индикаторами турбулентности в хромосфере. Так, при температурах, характерных для нижней хромосферы, даже небольшая турбулентная скорость 2 км/с более чем в 2 раза [13] превышает тепловую скорость ионов SrII и в 3 раза превышает тепловую скорость ионов BaII. Если различие нетепловых скоростей атомов NaI и ионов тяжелых элементов являлось бы реальным, то необходимо было бы вводить двухкомпонентные модели хромосферы с разными условиями свечения для нейтральных атомов и ионов.

Для подтверждения или опровержения реальности различия скоростей атомов и ионов тяжелых атомов на высотах порядка 1500 км в солнечной хромосфере во время затмения 31.07.1981 г. экспедиция АО ХНУ провела специальные наблюдения и получила серии бесщелевых спектров хромосферы в линиях резонансных дублетов NaI, SrII с разрешением по высоте порядка 30 км. При исследовании турбулентности тяжелых ионов были использованы также наблюдательные данные других авторов [14] для линий резонансного дублета BaII.

Оригинальный метод определения V_t по линиям резонансного дублета NaI был предложен Г. К. Аймановой и Р. А. Гуляевым [15]. Поскольку самопоглощением в нижней и средней хромосфере пренебрегать нельзя, метод основан на применении кривых роста. Кривые роста представляют собой зависимость интенсивности одной из линий дублета от числа атомов в нижнем состоянии в столбе единичного сечения по лучу зрения (N_i) при разных значениях V_t . Такое же семейство кривых роста при разных значениях V_t вычисляется и для отношения линий дублета в зависимости от N_i . Очевидно, что при правильном выборе V_t оба способа определения N_i должны давать близкие результаты. Формулы для вычисления кривых роста и результаты вычислений для ионов резонансного дублета SrII приведены в работе Белкиной и др. (1989), а для ионов резонансного дублета BaII – в работе Белкиной и др. (1991). Расчеты были проведены с учетом того, что в условиях невозмущенной хромосферы при $T_e < 10^4$ K, $n_e < 10^{12}$ см $^{-3}$ населенность верхних уровней атомов натрия ($3^2P_{1/2,3/2}$ NaI) и ионов стронция и бария ($5^2P_{1/2,3/2}$ SrII, $6^2P_{1/2,3/2}$ BaII) определяется рассеянием фотосферного излучения, которое в частотах линии излучения содержит фраунгоферовы линии. При расчетах N_i по отношению интенсивностей линий дублетов для ионов стронция и бария было принято во внимание, что коротковолновое крыло линии SrII λ 421,6 нм и линия BaII λ 493,4 являются блендированными, поэтому контуры этих линий несимметричны.

На рис. 2.9.9 слева приведены распределения с высотой в хромосфере количества ионов SrII N_i в столбе единичного сечения вдоль луча зрения. Сплошные линии получены по кривым роста для линии 407,8 нм, штриховые – по теоретическому отношению интенсивностей линий резонансного дублета стронция. Аналогично, справа приведены распределения для ионов BaII, где сплошные линии получены по кривым роста для линии 455,4 нм, а штриховые – по отношению интенсивностей линий дублета BaII.

Как показывает рис. 2.9.9, в невозмущенной хромосфере средняя скорость нетепловых движений ионов SrII на высотах 900 – 1200 км оказалась равной около 6 км/с. Это значение

близко к тому, которое было получено ранее для атомов NaI. Для ионов BaII в этом же интервале высот получилось даже меньшее значение $V_t = 3 \text{ км/с}$.

Белкина и др. (1989, 1991) показали, что именно неучтенное другими блендирование одной из линий резонансных дублетов ионов SrII и BaII существенно искажает кривые роста и приводит к большим значениям скорости $V_t \approx 10 \text{ км/с}$. Авторы указанных работ обнаружили также тенденцию к уменьшению средней скорости нетепловых движений атомов NaI и ионов SrII в активных областях по сравнению с невозмущенными. Они объясняют ее тем, что сильные магнитные поля активных областей могут подавлять турбулентные движения.

Таким образом, проведенные в АО ХНУ исследования подтвердили концепцию невысоких турбулентных скоростей атомов и тяжелых ионов в нижней и средней хромосфере и выявили разницу между активными и спокойными областями на Солнце по значениям средней скорости нетепловых движений.

Результаты исследований Солнца в рентгеновском диапазоне

В течение последних десятилетий по настоящее время мониторинг солнечной активности проводится с космических аппаратов (КА) в спектральных диапазонах, которые недоступны для наземных наблюдений из-за поглощения в земной атмосфере, таких как дальний ультрафиолет (EUV) и рентген (X-ray). КА серии GOES практически непрерывно, начиная с середины 70-х годов прошлого столетия, каждые 5 минут регистрируют рентгеновский поток от всего Солнца. Данные наблюдений, в том числе и оперативные, в настоящее время через Интернет доступны всем желающим.

Для исследования циклических изменений солнечной активности необходимы длинные временные ряды данных. Такие данные по излучению Солнца в диапазоне мягкого рентгена 0,1 – 0,4 нм были использованы в нашем НИИ астрономии для создания и исследования новых индексов вспышечной активности Солнца в этом диапазоне (Акимов и др., 2005). Один из этих индексов (XFI) является энергетическим, другой (Nx) – частотным индексом. Это выгодно отличает эти индексы от таких общеизвестных, как числа Вольфа или вспышечный индекс в линии H_α (OFI, индекс Клечека), физический смысл которых не является строго определенным. Индекс XFI с достаточной точностью представляет собой энергию на 1 м^2 на орбите Земли, выделенную за сутки всеми вспышками в диапазоне мягкого рентгена. Формула для вычисления XFI представлена в работе Акимова и др. (2003). Частотный индекс Nx представляет собой суточное количество рентгеновских вспышек. Ежедневные и среднемесячные значения XFI и Nx представлены на Веб-сайте «KHASSM» для периода с 01.09.1975 г. по 31.12.2005 г. Таким образом, временные ряды суточных значений индексов XFI и Nx охватывают почти 3 солнечных цикла (данные за 31 год). Они были использованы для сравнения поведения рентгеновских вспышечных индексов с другими солнечными индексами в циклах 21 – 23. Полученные в нашем институте ряды могут использоваться также и для изучения различных геофизических последствий солнечных вспышек, поскольку рентгеновское излучение вспышек ответственно, например, за ионосферные возмущения, приводящие к нарушениям в радиосвязи в коротковолновом диапазоне. На рис. 2.9.10 представлен временной ход среднемесячных индексов XFI и Nx в солнечных циклах 21 – 23.

Как показывает рис. 2.9.10, рентгеновские вспышечные индексы XFI и Nx отражают разные проявления солнечной активности. В то время как по поведению индекса XFI нынешний 23 цикл является самым слабым из 3-х изученных, количество рентгеновских вспышек в нем практически такое же, как и в предыдущем. Акимов и др. (2005) показали, что энергия, выделенная вспышками в рентгеновском диапазоне за 10 лет 23 солнечного цикла, оказалась в 2,6 раза меньшей по сравнению с аналогичным периодом 22 цикла. При одинаковом общем количестве вспышек это означает, что средняя энергия рентгеновских вспышек была в такое же число раз слабее в нынешнем цикле по сравнению с предыдущим. Поведение индекса Nx совпадает с ходом интегрального потока рентгеновского излучения Солнца, который изучили Дмитриев П. Б. и Милецкий Е. В. [16]. Сравнение данных этих авторов с данными Акимова и др. (2005) для Nx показывает, что интегральный поток рентгеновского излучения Солнца в большей степени определяется общим количеством вспышек, а не отдельными мощными вспышками, которые определяют временной ход индекса XFI.

Методами Фурье-анализа Акимов и др. (2005) исследовали квазипериодические изменения ежедневных рентгеновских вспышечных индексов XFI и Nx. Они нашли, что известный ≈ 150 -дневный период имеет статистически значимую амплитуду в нечетных циклах 21 и 23 и практически отсутствует в спектре мощности временных изменений этих индексов в 22

цикле. Авторы обнаружили еще одно отличие между нечетными циклами 21, 23 и циклом 22. В нечетных циклах существует запаздывание выделения энергии во вспышках по отношению к энергии пятнообразования, в 22 цикле такое запаздывание отсутствует. Этот результат существенен с точки зрения баланса между поступлениями магнитной энергии в систему и выделения ее в солнечных вспышках. Он подтверждает теоретические расчеты [17].

Следует отметить также еще одно направление в солнечных исследованиях, начатых в последние годы в НИИ астрономии ХНУ, – обработка материалов, полученных на КА Коронас-Ф. Эти исследования проводятся в научном сотрудничестве с Физическим институтом им. Лебедева РАН и ГАИШ МГУ. Харьковскими солнечниками было создано программное обеспечение для чистки изображений в линии MgXII 8,42 ангстрем от следов космических частиц и случайных помех, устранения неоднородностей фона и т.д. По данным СПИРИТ/КОРОНАС-Ф были проанализированы временные изменения интегральной интенсивности отдельных активных областей на Солнце в этой рентгеновской линии, изображения в которой относятся к самым горячим областям короны. В полученных спектрах мощности обнаружены статистически значимые пики с периодами в интервале 12 – 30 минут и 40 – 200 минут. Показано, что после всплывания нового фотосферного магнитного потока в активной области NOAA 9840 изменился спектр мощности в области этих периодов (Акимов и др., 2005). Работы по данным КА Коронас-Ф в отделе физики Солнца, Луны и планет продолжаются и в настоящее время.

Исследование дневного астроклимата на Чугуевской наблюдательной станции

Оптические и регистрирующие элементы нового спектрогелиографа, о котором речь пойдет в следующем разделе, позволяют получать изображения с разрешением не хуже 1 секунды дуги. Поэтому вполне естественно возникла необходимость широкого исследования дневного астроклимата на загородной станции НИИ астрономии, чтобы максимально реализовать возможности нового инструмента. Надо знать, как часто атмосферное замытие изображений не превышает 1 секунды дуги, в какое время суток надо проводить наблюдения, в какое время года и при каких атмосферных условиях дрожание минимально, каковы требования к павильону и окружающему ландшафту.

Кроме того, исследование турбулентной активности в степной зоне Украины представляет самостоятельный интерес. Наша наблюдательная станция расположена в открытой ровной степи в междуречье Донца и Оскола, на одной территории с известным декаметровым радиотелескопом РИ НАН Украины. Степь ровная, покрыта травой. При хорошей погоде обычно дуют ветры восточного направления (северо-восток, восток, юго-восток), т.е. со стороны радиотелескопа, который расположен на юго-востоке от станции и занимает площадь около 2х2 км.

Область изопланатичности дрожания солнечного края составляет около двух минут дуги, т.е. изображение такого диаметра при дрожаниях перемещается как целое без деформаций. Используя эту информацию и учитывая, что основной размер атмосферных неоднородностей составляет 10 – 20 см, Акимовым Л. А и Акимовым А. Л. (2001) была разработана следующая методика наблюдений. В фокальной плоскости фотосферного телескопа АФР-2, входное отверстие которого задиафрагмировано до 5 см, устанавливается прямоугольная диафрагма размером 20х50 секунд дуги. Край изображения Солнца устанавливается на расстоянии 30 секунд от края диафрагмы. В этом случае, с учетом распределения яркости по диску Солнца (Акимов и др., 2000), смещение края на одну секунду дуги приводит к изменению потока света через диафрагму на 4 процента. Свет, прошедший через диафрагму и зеленый фильтр, поступает на светоприемник (ФЭУ). Сигнал с фотоумножителя накапливается с помощью интегратора на операционном усилителе в течение 10 миллисекунд и затем записывается в память ЭВМ. Частота считывания 50 герц. Одна реализация записи составляет 512 отсчетов (около 10 секунд). Одна серия записи составляет 18 реализаций (около 3 минут). Серии измерений повторяются через полчаса. Предусмотрена возможность записи с частотой 512 гц.

По результатам измерений рассчитывались автокорреляционные функции $K(m) = \frac{\sum [u(n)-s][u(n+m)-s]}{N \cdot s \cdot s}$, где $u(n)$ – величина сигнала, n – номер отсчета, N – полное число отсчетов, s – среднее значение сигнала, суммирование ведется по n от 1 до $N-m$. Значение автокорреляционной функции в нуле пропорционально дисперсии сигнала, а значению $K(0) = 0,0001$ соответствует смещение края Солнца на 0,25 секунды дуги. Путем Фурье-

анализа автокорреляционной функции можно получить спектральную мощность сигнала. Поскольку интервал времени между реализациями составляет 80 миллисекунд, то по всей серии можно исследовать и низкочастотную составляющую сигнала.

С описанной аппаратурой и методикой наблюдения проводились с 1999 года с марта до октября. Наблюдениями охвачено 72 дня при различных состояниях погоды. Построены кривые суточной зависимости среднеквадратичных значений амплитуды дрожаний солнечного края. Проведены уникальные измерения в дни затмений 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 5 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г.

Анализ результатов наблюдений (рис. 2.9.11) показывает, что в летние дни при антициклональной погоде и при слабых или умеренных ветрах восточного направления среднеквадратичная величина амплитуды дрожания не превышает 0,6 секунды до 10 часов и достигает 0,7 – 0,8 секунды к полудню (кривая 1). При наличии снежного покрова (март 2001 г., март 2003 г.) среднеквадратичные значения амплитуды дрожания составляют около 0,9 секунды дуги и имеют слабую тенденцию уменьшаться с уменьшением зенитного расстояния Солнца (кривая 2). В мартовские и апрельские дни без снежного покрова и с мало развитой растительностью амплитуда дрожания составляет около 1 секунды до 10 часов декретного времени, когда обычно начинают появляться конвективные облака, затем растет к полудню (время киевское) до 1,2 – 1,3 секунды дуги (кривая 3).

Типичный дневной ход среднеквадратичной величины амплитуды дрожания солнечного края в летнее время можно проследить по результатам, полученным в день затмения 11 августа 1999 г. (рис. 2.9.12). Точки – результаты измерений в секундах дуги. Сплошная кривая – относительная освещенность поверхности земли. По оси абсцисс – киевское время. Утром, до начала образования конвективных облаков, амплитуда дрожания достаточно мала, почти не меняется с уменьшением зенитного расстояния Солнца. После того как поверхность достаточно прогреется и прогреет приземный слой атмосферы, начинают подниматься ячейки теплого воздуха, вовлекающие все более толстые слои в конвективные процессы, амплитуда дрожания солнечного края начинает расти с уменьшением зенитного расстояния.

Характерна реакция турбулентной активности атмосферы на «выключение светила», хорошо выраженная 11 августа 1999 г., когда затмение происходило в разгар летнего дня. К моменту максимальной фазы турбулентная активность нижней атмосферы почти полностью прекратилась, амплитуда дрожания солнечного края уменьшилась втрое по сравнению с амплитудой перед началом затмения и достигла значения 0,38 секунды дуги. По этим данным оценено время релаксации турбулентной активности. Оно составляет 16 минут.

Таким образом, для исследуемого периода среднеквадратическая величина амплитуды дрожания солнечного края не превышает 1 секунды дуги в 70 процентах случаев. В летнюю, устойчивую антициклональную погоду амплитуда дрожаний солнечного края не превышает 0,9 секунды, а в утренние и вечерние часы составляет, как правило, 0,5 – 0,6 секунды дуги.

Следует считать, что дневной астроклимат на территории наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ позволяет реализовать высокое пространственное разрешение нового спектрогелиографа и рекомендовать его установку на территории станции.

Разработанная аппаратура и методика измерений амплитуды дрожания небесных объектов может применяться как в полевых, так и в стационарных условиях, а также и при ночных наблюдениях, для чего можно использовать край Луны или расфокусированное изображение ярких звезд.

Харьковский спектрогелиограф для оперативной регистрации солнечной активности

В настоящее время по договору УНТЦ в мастерских ИРЭ НАНУ им. А. Я. Усикова изготавливается новый спектрогелиограф для нашей обсерватории. В разработке концепции инструмента, его конструировании и изготовлении активное участие принимали сотрудники обсерватории Акимов Л. А., Белкина И. Л., Железняк А. П., Коничек В. П., Корохин В. В., Синельников И. Е. Инструмент будет установлен на территории Чугуевской наблюдательной станции.

Основные параметры инструмента следующие:

- 1) Диаметр входного отверстия телескопа 30 см.
- 2) Пространственное разрешение не хуже 1 сек. дуги по всему диску Солнца.
- 3) Размер заштрихованной части дифракционной решетки 18 x 20 см, решетка имеет 600 штрихов на мм.
- 4) Спектральное разрешение в зеленой области спектра не хуже 0,1 ангстрема.
- 5) Две камеры спектрографа позволяют одновременно получить изображение

- Солнца в линии H_{α} водорода и в линии 10830 ангстрем гелия.
- 6) Регистрация спектра осуществляется матрицей светочувствительных диодов, имеющей 2048 x 2048 элементов размером 12 мкм. Информация считывается с любого заданного количества строк, столбцов или площадки.
 - 7) Область светочувствительности от 350 нм до 1200 нм.
 - 8) Поворотом решетки можно на матрицу направить любую область спектра.
 - 9) Скорость регистрации позволяет получать изображение диска Солнца за 1 минуту.
 - 10) Сканирование изображения Солнца на щели спектрографа осуществляется поворотом плоского зеркала, установленного перед объективом телескопа.
 - 11) Цифровая информация от обеих матриц передается на центральный компьютер, где производится оперативная обработка изображений Солнца.
 - 12) Скорость получения изображений сравнима со скоростью получения фильмограмм с интерференционными фильтрами. Однако инструмент позволяет получать одновременно изображения как в центре линии, так и в крыльях, а значит и скорости по лучу зрения, что весьма важно для изучения нестационарных процессов. При изучении быстрых процессов во вспышках изображение активной области размером меньше одной минуты дуги можно получать каждую секунду.

Эксплуатация этого инструмента позволит реализовать ряд интересных оригинальных программ по изучению солнечной активности, автоматизировать процесс наблюдений и обработки результатов наблюдений, выйти на новый мировой уровень в исследованиях Солнца.

Литература

- [1] *Gulyaev R. A.* On the temperature of the helium emission regions in the solar atmosphere // *Solar Phys.* – 1972. – 24, №1. – P. 72-78.
- [2] *Перепелкин Е. И., Мельников О. А.* Изучение эмиссии гелия в линии D3 в спектре хромосферы // *Бюлл. Пулк. Обс.* – 1935. – 14, №122. – С. 1-16.
- [3] *Athay R. G., Menzel D. H.* A Model of the Chromosphere from the Helium and Continuum Emission // *Astrophys. J.* – 1956. – V.123. – P.285-298.
- [4] *White O. R.* A He (D₃) Emission Shell in the Solar Chromosphere // *Astrophys. J.* – 1963. – V. 138. – P.1316-1317.
- [5] *Шкловский И. С.* Ионизация хромосферы и протуберанцев и проблема распределения плотности в хромосфере // *Труды ГАИШ.* – 1951. – Т.20. – С. 5-25.
- [6] *Никольская К. И.* Возбуждение линий гелия в хромосферных спикулах // *Астрон. журн.* -1966. – Т.43, №5. – С.936-941.
- [7] *Сомов Б. В., Козлова Л. М.* О тонкой структуре солнечной хромосферы по наблюдениям ИК-линии HeI // *Астрон. журн.* – 1998. – Т.6. – С. 926-934.
- [8] *Аллен К. У.* Астрофизические величины. – М.: Мир, 1977. – 446с.
- [9] *Брюнелли Б. Е., Намагаладзе А. А.* Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528с.
- [10] *Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М.* Солнце и ионосфера. – М.: Наука, 1969. – 455 с.
- [11] *Соболев В. М., Вяльшин Г. Ф., Наговицын Ю. А.* Турбулентные скорости и кинетические температуры в хромосфере по материалам полного солнечного затмения 30 июня 1973 г. // *Солн. данные.* – 1980. – №7. – С. 88-93.
- [12] *Unno W.* Turbulent motion in the solar atmosphere / *Astrophys. J.* – 1969. – V.129, N2. – P. 375-387.
- [13] *Landman D. A.* Some spectral plasma diagnostics for prominences and structure in the middle chromosphere // *Astrophys. J.* – 1983. – V.269, N2. – P. 728-742
- [14] *Dunn R. B., Evans I. W. et al.* The chromospheric spectrum at the 1962 eclipse // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1968. – V.15, No 3-9. – P. 275-458.
- [15] *Айманова Г. К., Гуляев Р. А.* Распределение нейтрального натрия и скорость нетепловых движений в нижней хромосфере по затменным наблюдениям резонансного дублета D_{1,2} // *Астрон. журн.* – 1976. – Т. 53, №2. – С.353-360.
- [16] *Дмитриев П. Б., Милецкий Е. В.* Временные вариации рентгеновского индекса солнечной активности: сравнительный анализ и возможности прогнозирования // *Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности».* – 2006. – САО РАН, Н.Архыз. – С.19.
- [17] *Wheatland M., Litvinenko Y.* Energy balance in the flaring solar corona // *Astrophys. J.* –

2001. – V.557. – P. 332-336.

2.10. АСТРОМЕТРИЯ В XX ВЕКЕ

к.ф.-м.н. П. Н. Федоров

Введение

Истоки астрометрии – этого наиболее древнего раздела астрономии – относятся ко времени зарождения первых цивилизаций. Из дошедшей до нас древнегреческой истории известен только каталог эклиптических долгот и широт эпохи 123 г. до нашей эры, полученный Гиппархом на основе своих наблюдений. Уже тогда, сравнивая данные своего каталога с данными каталога зодиакальной зоны Аристилла и Тимохариса, которые, к сожалению, не дошли до наших дней, Гиппарх обнаружил явление прецессии. Ошибка численного значения величины прецессии составила примерно 30%. Тем не менее, это свидетельствует о высоком уровне астрономических знаний того времени, существенно превосходящем уровень знаний сменившего его темного европейского средневековья.

Развитие астрономии естественно разделить на дотелескопическую эпоху и телескопическую. Основное достижение дотелескопической астрономии – это открытие Иоганном Кеплером трех законов движения планет, которые, в свою очередь, были использованы Ньютоном для обоснования закона всемирного тяготения. Телескопический период имеет большую историю, связанную, в основном, с астрометрическими телескопами и новыми методами определения положений небесных объектов и их изменений.

Сейчас после осуществления проекта HIPPARCOS историю астрометрии логично разделить на два периода: до запуска спутника Hipparcos и после него. Это деление предполагает различие по признаку наземных и космических методов определений. Таким образом, догиппарковский период имеет более чем двухтысячелетнюю историю.

Интересно оценить объем астрономической информации, например, о звездном небе (не считая Солнца, Луны, планет и комет), полученной в дотелескопическую эпоху. Оказывается, для каждой звезды можно было получить примерно 37 бит информации (блеск – 2^7 , цвет – 2^3 , положение – 2^{27}). Таким образом, общее количество информации о звездах, доступной людям в дотелескопическую эпоху, а точнее во всю доспектроскопическую эпоху развития астрономии, буквально поражает своей мизерностью: ≈ 25 Кбайт. Реально же к моменту изобретения телескопа было собрано менее 10% этой информации – каталогов слабых по меркам того времени звезд (5^m – 6^m) не существовало, а блеск и цвет оценивались очень грубо. А как обстоит дело сегодня? Один только спутник Hipparcos передал на Землю 1000 Гбайт данных. А сегодня каждый день приносит примерно 1 терабайт астрономической информации.

Наибольший вклад в решение основной проблемы астрометрии, формулируемой как создание инерциальной (невращающейся) координатно-временной системы, внесли, по нашему мнению, следующие астрометрические методы: меридианный метод, фотографический метод и развитый в середине XX века радиоинтерферометрический метод со сверхдлинными базами (РСДБ). Каждый из этих методов составил по существу новую эпоху в истории астрометрии.

Астрометрия начала XX века – это преимущественно меридианная астрометрия, использующая идеи Бадделя и Бесселя. Первый из них открыл и дал физическую интерпретацию основных редуций меридианной астрометрии, включая аберрацию и нутацию, а второй создал теорию абсолютных меридианных наблюдений, а также составил первый фундаментальный каталог – *Tables Regiomontani*. Последующее развитие этих идей связано с Пулковской школой (фактически русско-немецкой), созданной В. Я. Струве, который добился наивысшей точности абсолютных наблюдений. Чуть позже эти же идеи получили дальнейшее развитие в работах берлинской (немецкой) школы Ауверса, а затем в каталогах немецкого астрономического общества.

Астрометрия в Харькове

К своему столетнему юбилею – 1905 г., Харьковский университет имел свою небольшую, но вполне дееспособную обсерваторию, используемую как для учебного процесса, так и для серьезных научных работ. Ее персонал состоял из заведующего обсерваторией – профессора Л. О. Струве, астронома-наблюдателя приват-доцента Н. Н. Евдокимова, механика В. Н. Деревянко и вычислителя Х. В. Громана. Должность сверхштатного ассистента оставалась в это время незанятой, так как университет не оплачивал ее. Кафедру астрономии с 1894 г. возглавлял также Л. О. Струве – представитель Пулковской школы и внук знаменитого основателя Пулковской обсерватории – В. Струве.

Во второй половине XIX и начале XX века произошло осознание необходимости проведения астрономами всего мира скоординированных наблюдательных работ во всех областях астрономии. Германское астрономическое общество организовало первое кооперативное предприятие по созданию зонных каталогов AGK (Astronomischer Gesellschaft Katalog). Для этого необходимо было создать опорный каталог, в системе которого и проводились бы наблюдения. Такой каталог был создан в 1879 г. и имел название FC. Это был первый каталог, положивший начало серии фундаментальных каталогов FK вплоть до FK6.

К началу XX века был сформулирован план построения и развития астрометрии на ближайшие десятилетия. Содержание этого плана состояло из трех основополагающих частей, заключающихся в следующем:

- построение инерциальной системы координат,
- определение поправок нуль-пунктов созданной системы координат на основе наблюдений больших планет и определение поправки к постоянной прецессии,
- создание системы астрономических постоянных.

Этот план, как оказалось впоследствии, осуществлялся на протяжении почти всего XX века и наглядно продемонстрировал плодотворность международного сотрудничества при решении трудоемких наблюдательных задач и предвосхитил некоторые черты крупных современных наблюдательных программ.

Л. О. Струве, по всей вероятности, был прекрасно информирован о состоянии дел в Германском астрономическом обществе, объединявшем тогда многих астрономов из разных стран мира. Он вел обширную переписку с членами этого общества, посещал зарубежные астрономические съезды, был лично знаком со многими наиболее влиятельными астрономами того времени (например, с Г. Зеелигером – президентом астрономического общества) и потому хорошо представлял себе проблемы тогдашней астрометрии. Рассмотрим некоторые из них:

1. Наблюдения зодиакальной зоны в то время были важны по ряду причин. Во-первых, необходимо было обеспечить опорными звездами наблюдения планет, во-вторых, для совершенствования каталога 303 звезд для южных зон.

2. Еще в 1897 году Ауверс обратился ко всем астрономам с призывом пронаблюдать полярные звезды, поскольку в каталоге FC содержалось всего 10 звезд со склонением от $81,8^\circ$ до полюса. Это представляло серьезную проблему, т.к. на протяжении 24 часов имелось четыре промежутка длительностью около 3 часов, когда ни одна из этих звезд не кульминировала.

3. Кроме того, на рубеже веков внимание астрономов было привлечено к малой планете Эрос. Важность наблюдений Эроса была связана с уникальной возможностью определения параллакса Солнца (расстояния до Солнца) несравненно точнее, чем любым другим методом того времени. Это позволяло уточнить масштабы Солнечной системы. Для решения этой задачи необходимо было определять положения и собственные движения опорных звезд, относительно которых измерялись положения Эроса. Результаты этой коллективной работы были опубликованы в 1910 г. и свидетельствовали о том, что параллакс Солнца равен $8'',806$; это дало величину астрономической единицы 149,6 млн. км.

Л. Струве отлично понимал значимость этих задач. Его усилия были направлены на участие в их решении и дальнейшее развитие обсерватории. Он стремился задействовать Харьковскую обсерваторию в работах по созданию фундаментального каталога NFK, который был окончательно завершён Петерсом в 1907 г. на базе каталогов FC, A_{303} , A_s и новых рядов наблюдений. Система каталога NFK просуществовала до 1940 года.

На меридианном круге Л. Струве совместно с Н. Н. Евдокимовым были проведены наблюдения, на базе которых составлен каталог «Наблюдения 779 зодиакальных звезд по

склонению» (1898 – 1902 г.г.). Кроме того, в течение двух зим 1900/1901 и 1901/1902 г.г. Струве и Евдокимов выполняли свою часть международной программы «Определение положений звезд-реперов для планеты Эрос». Откликнулась Харьковская обсерватория и на призыв Ауверса. С 1908 по 1915 г. на меридианном круге производились наблюдения координат звезд, близких к полюсу.

Визуальные меридианные наблюдения во все времена были достаточно сложными и трудоемкими. Они требовали от наблюдателей определенного «слияния» с инструментом. Термин «искусство наблюдателя», столь непонятный и вызывающий усмешку у современного компьютеризированного оператора-наблюдателя, в то время не был пустым звуком. Далеко не всем наблюдателям удавалось овладеть этим искусством, поскольку оно требовало не только дисциплинированности, самоотдачи, строжайшего выполнения алгоритмов наблюдений, но и, в каком-то смысле, определенной одаренности и таланта.

Профессор Л.О. Струве был очень дисциплинированным наблюдателем. Он всегда приходил на наблюдения к 21 часу. К этому моменту вышколенная техническая работница должна была принести из соседней лавочки 6 бутылок пива, которые к концу наблюдательной ночи всегда опустошались. Обработывая свои наблюдения в директорском кабинете, он курил почти непрерывно, и его практически не было видно из-за дыма папирос.

Л. Струве уделял большое внимание усовершенствованию и модернизации меридианного круга обсерватории. Он был инициатором работ по созданию горизонтальных коллиматоров для лабораторного определения коллимации, по переделке окулярного микрометра, по защите труб от влияния теплоты, по оснащению объектива сетками для ослабления яркости. Кроме того, он организовал школу-мастерскую точной механики при Харьковской обсерватории и кружок астрономии, в состав которой входили тогда еще совсем молодые В. Фесенков, Н. Барабашов, Б. Герасимович, В. Каврайский и другие. Немало внимания Струве уделял преподавательской деятельности. Он был единственным преподавателем, читавшим все астрономические курсы. Говорят, что его лекции в университете не были легкими для восприятия. Однажды во время лекции, когда он очень энергично размахивал руками, показывая небесную сферу, в разные стороны разлетелись пристегиваемые манжеты, вызвав дикий хохот студентов.

В последующие годы развитие меридианной астрометрии в ХАО было связано с использованием меридианного круга и пассажного инструмента Бамберга, приобретенного в 1928 году. К большому сожалению, наблюдения, выполненные на меридианном круге, обрабатывались не так быстро, как хотелось бы. Тому были объективные причины.

Астрометрические работы не ограничивались только меридианными наблюдениями. До 1914 г. на обсерватории с помощью горизонтальных маятников производились сейсмические наблюдения, пока они не были признаны не удовлетворяющими требованиям, предъявляемым к сейсмическим наблюдениям. Наблюдались покрытия и затмения. В этом же 1914 году обсерваторией была организована экспедиция в Генчиск (Херсонская обл.) для наблюдения полного солнечного затмения. Кроме того, Л. О. Струве произвел новыми методами обработку наблюдений своего деда – В. Струве, выполненных в 20-х годах XIX столетия в Дерптской обсерватории.

Наблюдения зодиакальных звезд были закончены к лету 1906 года. Затем в течение двух лет 1906 – 1908 г.г. Н. Н. Евдокимов производил наблюдения для определения параллаксов звезд. Это была уникальная по тем временам работа. В своем отзыве на эту работу Л. О. Струве писал: «... я могу только выразить свое удовольствие, что мне приходится давать факультету отзыв о таком достойном труде, и свою радость, что такая ценная научная работа произведена на маленькой обсерватории Харьковского университета». Эта работа была допущена к защите в качестве диссертации на степень магистра астрономии и геодезии, а впоследствии за нее Н. Н. Евдокимов был удостоен премии русского астрономического общества.

Как уже упоминалось, в 1908 – 1915 г.г. на меридианном круге производились наблюдения координат звезд, близких к полюсу. В этой большой работе по определению прямых восхождений и склонений 1407 близполюсных звезд до 9.0^m от 79° до полюса принимали участие 3 наблюдателя: Л. Струве, Н. Евдокимов и Б. Кудревич. Эти наблюдения проводились в системе 106 опорных звезд NFK от 65° до полюса. Каждая звезда была наблюдена как минимум 4 раза: в 2-х положениях круга и в 2-х кульминациях. В 1914 г. (июнь-август) были проведены специальные наблюдения Л. О. Струве, К. Г. Гинце и Б. П. Герасимовичем

для определения одной из наиболее тяжело устранимых систематических ошибок – гнутия меридианного круга. Определение положений близполюсных звезд было чрезвычайно актуальной работой, но обстоятельства сложились так, что обработка этих наблюдений окончательно завершилась только в 1980 г. под руководством К. Н. Кузьменко – заведующей кафедрой астрономии Харьковского университета, а опубликована она была уже после смерти К. Н. Кузьменко, под названием «Харьковский дифференциальный каталог склонений 1407 близполюсных звезд в системе FK4 для средней эпохи 1911 года» и «Результаты сравнения Харьковского каталога склонений 1407 близполюсных звезд с каталогом Фабрициуса (с таблицами собственных движений 412 близполюсных звезд)». К сожалению, ленты хронографа, на которых зафиксированы моменты прохождений звезд через меридиан, в бурных событиях XX века сохранились лишь частично, и прямые восхождения не были выведены из наблюдений.

Трудности, начавшиеся во время Империалистической войны 1914 года, переросли во время революции и последовавшей затем гражданской войны в настоящее бедствие. Не было не только журналов и книг, не было даже бумаги для работы. Несколько лет совсем не было отопления, что привело к выходу из строя аккумуляторов и к остановке часов. Хронометры приходилось хранить в погребах, поскольку там было теплее, чем в кабинетах и квартирах сотрудников (в квартирах часто и проходили занятия со студентами). Во время топливного кризиса заборы и тротуары были расхищены, обсерватория оказалась совершенно не огороженной, по территории обсерватории между павильонами телескопов гуляли коровы и козы. Только благодаря вмешательству Главкома М. В. Фрунзе, обсерватория была огорожена колючей проволокой. Такое положение дел было и в 30-е годы. Окрестные овраги были родным домом для люмпенизированного контингента. Эти люди «трудились» здесь по ночам. Они знали всех сотрудников в лицо и, надо сказать, вели себя по отношению к ним достаточно благородно. В. Х. Плужников вспоминал, что когда ему приходилось по ночам ходить на обсерваторию, его часто встречали эти люди, но, узнав, кто идет, разочарованно говорили друг другу: «Не трогай! Это свой».

На протяжении 1917 – 1923 г.г. обсерватория потеряла значительную часть своего состава. Умер профессор Л. О. Струве, ассистент К. Г. Гинце, вычислитель И. А. Божко. Перешел в Москву В. Г. Фесенков, уехал в Чехию астроном И. И. Сикора, после скитаний оказался в Америке О. Л. Струве. О тяжелых условиях жизни русских коллег знали астрономы во всем мире. Старались помочь разными способами. Например, в самое тяжелое время американская организация Обсерваторий высылала пищевые посылки нашим обсерваториям.

В 20-е годы на левобережной Украине имелись пункты только с односторонним определением долгот. Создание замкнутой сети долгот являлось задачей первостепенной важности. Выполнение ее легло на Украинское геодезическое управление (УГУ) и на украинские обсерватории, в том числе и на Харьковскую обсерваторию. В 1923 г. переехал в Харьков и начал работать в обсерватории Б. П. Остащенко-Кудрявцев. До этого времени он возглавлял Николаевское отделение Пулковской обсерватории. Длительное время Н. Н. Евдокимов и Б. П. Остащенко-Кудрявцев были членами УГУ, членами Бюро долгот и принимали самое активное участие в обширных астрономо-геодезических работах, проводившихся в 1924 – 1929 г.г. на Украине. Астрономическая обсерватория работала в тесной связи с городскими властями по вопросу проведения геодезической съемки города Харькова, а Н. Н. Евдокимов был консультантом в вопросах построения тригонометрической сети. В это же время Н. Н. Евдокимов и Н. П. Барабашов определяли поправки часов меридианным кругом и предоставляли точное время для проверки городских часов.

Продолжая работы в контексте AGK, Н. Н. Евдокимов и Б. П. Остащенко-Кудрявцев возобновили исследование меридианного круга для подготовки его к наблюдениям по новым программам. Была предложена программа исследования зальной рефракции и определения коэффициента рефракции из наблюдений. В период 1924 – 1932 г.г. Н. Н. Евдокимовым и Б. П. Остащенко-Кудрявцевым проводились *абсолютные* наблюдения склонений 270 фундаментальных звезд по программе, составленной Н. Н. Евдокимовым. Параллельно проводились наблюдения больших планет с целью получения их склонений.

В 1928 г. в Гейдельберге состоялся очередной съезд Международного астрономического общества. На этот съезд были командированы Н. Н. Евдокимов и Б. П. Остащенко-Кудрявцев. На съезде была предложена кооперативная работа по наблюдению звезд Копфа-Ренца. Положения этих звезд предназначались для включения в фундаментальный каталог

FK3. В 1929 – 1933 г.г. Б. П. Остащенко-Кудрявцев выполнил наблюдения 51 звезды из списка Копфа-Ренца, дополнительно включенных в NFK. Ему же, как одному из лучших специалистов того времени, была поручена обработка наблюдений абсолютных склонений звезд, выполненных на вертикальном круге Николаевской обсерватории с целью создания каталога P_{1915} .

В 1931 году во время противостояния Эроса были выполнены наблюдения звезд-реперов для определения его координат. В 1928 году голландские астрономы Сандерс и Раймонд предложили новую идею определения абсолютных склонений из одновременных наблюдений на меридианном круге и пассажном инструменте одних и тех же пар звезд. В период 1935 – 1938 г.г. Н. Н. Евдокимов и В. А. Михайлов провели наблюдения пар Талькотта по способу Сандерса-Раймонда. Н. Н. Евдокимов получал суммы зенитных расстояний на меридианном круге, а В. А. Михайлов получал их разности на пассажном инструменте Бамберга. К преимуществам этого метода следует отнести отсутствие необходимости интерполировать нуль-пункт инструмента. Кроме того, он позволяет из наблюдений определять горизонтальное и вертикальное гнутие и дает возможность контролировать полученные склонения.

В довоенные годы Евдокимов и Остащенко-Кудрявцев проводили наблюдения больших планет с целью уточнения их орбит, а также привязки к звездной системе координат. Были выполнены три серии наблюдений больших планет: 1-я в 1924 – 1927 г.г. (наблюдатель Евдокимов), 2-я в 1934 – 1939 г.г. (наблюдатель Остащенко-Кудрявцев) и 3-я в 1935 – 1938 г.г. (наблюдатель Евдокимов).

В это время использовался и пассажный инструмент для меридианных наблюдений. Как уже упоминалось, на нем проводились наблюдения склонений по разностям зенитных расстояний (инструмент работал как зенит-телескоп), по определению положений больших планет, определялись прямые восхождения звезд цепным методом (1933 – 1941 г.г.), предложенным в Пулково, определялась широта нашей астрономической обсерватории и ряд других работ. Практически все эти работы, а также исследования пассажного инструмента были выполнены В. А. Михайловым, который совмещал работу на обоих астрометрических инструментах с педагогической деятельностью на кафедре астрономии и в институте геодезии.

Важным организующим началом в этот период были регулярные Всесоюзные астрометрические конференции. Были организованы несколько коллективных кампаний для наблюдений звезд КГЗ (каталог геодезических звезд), ФКСЗ (фундаментальный каталог слабых звезд), КСЗ (каталог слабых звезд), программы широтных звезд, международной программы ярких звезд, Солнца и больших планет (1960, 1989 г.г.), а также экспедиции в южное полушарие – в Чили (1967 – 1973 г.г.) и на Шпицберген (1974 – 1977 г.г.).

В связи с развитием небесной механики и звездной астрономии в 20-е годы перед астрометрией возникла новая проблема. Было доказано, что Солнце вместе со звездами Галактики вращается вокруг ее центра и, следовательно, систему координат, связанную с Солнцем, нельзя считать строго инерциальной. В 1932 г. на I Всесоюзной астрометрической конференции в Ленинграде астрономами Б. П. Герасимовичем (кстати, тогда еще сотрудником Харьковской обсерватории) и Н. И. Днепровским была выдвинута идея использования внегалактических туманностей в качестве неподвижных опорных реперов для определения собственных движений звезд. Астрометрическая привязка слабых звезд к галактикам дает возможность получить абсолютные собственные движения звезд и создать почти идеальную инерциальную систему координат, не зависящую от движений в нашей Галактике. Эта идея была воплощена в проект «Каталога слабых звезд», который включал в себя пять тесно связанных друг с другом задач:

1. Создание каталога «слабых» звезд (КСЗ) как опорной системы для дифференциальных меридианных наблюдений.
2. Определение нуль-пунктов отсчетов для α и δ по наблюдениям малых планет.
3. Установление связи КСЗ с фундаментальным каталогом.
4. Создание общего каталога «слабых» звезд путем относительных наблюдений на меридианных кругах.
5. Осуществление фотографической привязки положений звезд КСЗ к внегалактическим объектам для получения собственных движений звезд независимо от меридианных наблюдений.

В 1940 г. под руководством Н. Н. Евдокимова меридианный круг был подготовлен механиком А. С. Салыгиным для участия в этих работах. Зимой 1940 – 1941 г.г. было произ-

ведено исследование цапф по способу Чаллиса и определены периодические и ходовые ошибки обоих винтов микрометра (В. А. Михайлов и В. В. Ключко). Весной 1941 г. В. А. Михайлов начал наблюдения склонений КСЗ на меридианном круге. Однако смерть профессора Н. Н. Евдокимова в апреле 1941 г. и последовавшая затем Великая Отечественная война 1941 – 1945 г.г. не позволили осуществить эту идею в Харьковской обсерватории быстро.

Великая Отечественная война перечеркнула все планы развития обсерватории. Были эвакуированы не подлежащие призыву сотрудники обсерватории, но вывезти астрономические инструменты из обсерватории Университету не удалось.

Временно исполняющим обязанности директора астрономической обсерватории за несколько часов до начала первой оккупации был назначен В. А. Михайлов. Именно ему, а также Кузьме Никитовичу Зиньковскому (завхозу обсерватории) и Александру Станиславовичу Салыгину (механику обсерватории) пришлось приложить немало сил и житейской смекалки, для того чтобы сохранить практически все инструменты и оптику в целости. Они сумели законсервировать и спрятать большую часть всего оборудования и научной библиотеки в подвалах обсерватории и собственных квартирах. Как пишет в своем дневнике В. А. Михайлов, «...неоценимую помощь при сохранении имущества Астрономической обсерватории и «отвода» немцев от обсерватории оказал завхоз К. Н. Зиньковский». Как он это делал – неизвестно. Но известно, что «...ему еще не раз приходилось отлеживаться после ударов немецкими прикладами».

Отдельно необходимо отметить, что 10 ноября 1943 г. были найдены ящики с личным архивом Струве, в котором огромное количество документов датируется началом XIX столетия. Первую предварительную опись документальной коллекции составил В. А. Михайлов.

Вот лишь несколько фактов и эпизодов того трагического времени. В начале зимы 1941 года Михайлову и Зиньковскому удалось добиться освобождения из заложников наблюдателя Астрономической обсерватории Г. Посошкова (лейтенанта Красной Армии). В это же время на территории обсерватории скрывался от явки на регистрацию раненый лейтенант Красной Армии Иван Матвеевич Половик – сын техработника обсерватории.

Клавдия Нестеровна Кузьменко, окончившая летом 1941 г. астрономическое отделение университета, совсем еще молодая девушка, Лидия Ивановна Крысенко и В. А. Михайлов в 1942 г. выполняли наблюдения Солнца на 4-х дюймовом рефракторе. Впоследствии эти наблюдения не понадобились никому. Но для них не было вопроса, понадобятся или не понадобятся. Они, голодные и не знающие своего будущего, не делали скидку на войну, а честно делали свое дело. Преувеличения тут нет. Ведь Алексей Иванович Раздольский – доктор наук, профессор, Юрий Николаевич Фадеев – кандидат наук, доцент, Людмила Михайловна Костыря – вычислитель обсерватории умерли от голода в 1942 г. А вот В. А. Михайлов и А. С. Салыгин несколько раз опухали от голода, но остались в живых.

23 августа 1943 г. Харьков был освобожден. Но жизнь в Харькове не сразу стала нормальной. Только 1 октября 1943 г. в дневнике Михайлова появилась запись: «Перед вечером узнал случайно о получении пайков». Это было настоящее богатство. Масло, селедка, сахар, папиросы, мыло и даже чай. А потом следует такая запись: «Сегодня впервые за 2 года опять с наслаждением пил крепкий чай и закусывал его папиросами! Часов в 10 вечера любовался небом. Исключительно прекрасное!»

О других сотрудниках обсерватории, находившихся во время оккупации в Харькове, известно следующее: Ученый секретарь Астрономической обсерватории, декан физ.-мат. факультета Харьковского педагогического института Саврон Мстислав Сергеевич был убит в квартире своей сестры выстрелом в лицо. Григорий Лазаревич Страшный – научный сотрудник обсерватории – был замучен в гетто. Профессор Семилетов Сергей Матвеевич погиб от авиабомбы, которая разорвалась рядом с окном его дома. Баланский Василий Алексеевич – аспирант обсерватории – пропал без вести во время бомбежки Харькова.

В июле 1943 г., когда советские войска были уже совсем близко от Харькова, В. А. Михайлов и Л. И. Крысенко получили извещение о вывозе имущества Астрономической обсерватории из Харькова и предложение эвакуироваться в Краковскую астрономическую обсерваторию с правом забрать с собой семью, мебель, библиотеку. Для этого им предоставлялся отдельный вагон. Затем в середине августа немцы предупредили, что обсерватория будет взорвана. Несколько наиболее ценных частей инструментов удалось выкрасть ночью и спрятать в квартире сотрудницы метеорологической обсерватории О. Томашевич. К счастью, вследствие возникшей в городе паники эти планы немцам не удалось реализовать.

В первые послевоенные годы все усилия были направлены на восстановление обсерватории. Приводились в рабочее состояние инструменты, часы, павильоны (павильон меридианного круга был поврежден) и все, что необходимо для нормальной работы. Были продолжены работы по наблюдениям покрытий звезд Луной, затмений и т.д. После восстановления павильона меридианного круга в 1946 г., К. Н. Кузьменко исследовала ошибки делений меридианного круга по способу Брунса через 1° и совместно с В. А. Михайловым исследовала ошибки винтов окулярного микрометра и микроскоп-микрометров меридианного круга. Они же выполнили работы по полному исследованию меридианного круга обсерватории, который во время войны находился в разобранном состоянии.

Кому-то может показаться странным столь частое исследование инструмента. Известно высказывание Ф. Бесселя, что инструмент создается дважды: во-первых, его конструктором, а во-вторых, наблюдателем, путем исследования его инструментальных погрешностей. И путь этот всегда требовал творческого подхода.

С 1947 г. основной астрометрической задачей обсерватории была задача по наблюдению звезд для каталога КСЗ, которая выполнялась под руководством Б. П. Остащенко-Кудрявцева. В 1948 – 1953 г.г. наблюдения производил В. А. Михайлов, придерживаясь общей инструкции Астрометрической комиссии Астросовета АН СССР. Большая занятость В. А. Михайлова административной, педагогической и методической работой в университете, а главное все ухудшающееся состояние здоровья, не позволили ему довести эту работу до конца. Обработку наблюдений ФКСЗ уже после смерти В. А. Михайлова выполнили К. Н. Кузьменко, Н. С. Олифер, Л. С. Павленко и В. Х. Плужников.

Следует отметить, что с возвращением из Германии В. Х. Плужникова, где он на протяжении нескольких лет после окончания войны руководил сектором ВУЗов в отделе Народного образования Советской Военной администрации в Германии, кадровая ситуация в отделе астрометрии существенно улучшилась. В. Х. Плужников был опытным и высококвалифицированным специалистом и педагогом. Именно он и К. Н. Кузьменко возглавили и продолжили астрометрические работы в послевоенный период.

В 1952 – 1956 г.г. К. Н. Кузьменко и В. Х. Плужников на меридианном круге определяли прямые восхождения звезд ФКСЗ. Каталоги склонений и прямых восхождений были опубликованы. Результаты этих наблюдений вошли в сводные каталоги ПФКСЗ-1 и ПФКСЗ-2.

Зона близполюсных звезд по величине своих систематических ошибок резко выделяется среди других зон. Даже фундаментальные системы сильно расходятся в зонах, близких к полюсам. Это расхождение увеличивается со временем вследствие влияния ошибок системы собственных движений. В связи с этим в 1958 – 1963 г.г. К. Н. Кузьменко, В. Х. Плужников и С. М. Гриценко произвели повторные наблюдения около 600 звезд в зоне склонений от $+79^\circ$ до $+90^\circ$ для определения их прямых восхождений относительно звезд соседней зоны. Полученные координаты звезд сравнивались с наблюдениями 1909 – 1914 г.г. Проведена совместная обработка обеих серий этих наблюдений (К. Н. Кузьменко, В. М. Кирпатовский, Р. М. Шутьева, Л. С. Павленко) с целью получения собственных движений звезд. В фундаментальной астрометрии именно по близполюсным звездам (в комбинации с часовыми) выводят абсолютный азимут инструмента и абсолютное значение широты, а потому они имеют особое значение для астрометрии. Данная работа продемонстрировала высокое качество харьковского каталога склонений и малые случайные и систематические ошибки собственных движений. Естественным продолжением этого направления была работа (наблюдения и обработка), выполненная в 80-е годы А. Ф. Ванцан. Был создан и опубликован дифференциальный каталог прямых восхождений 630 близполюсных звезд, полученных по меридианным наблюдениям в Харькове в 1981 – 1984 г.г.

В 1968 – 1973 г.г. были проведены наблюдения и созданы два зонных каталога прямых восхождений ярких звезд (К. Н. Деркач и Н. Г. Зуев). Эти работы были нацелены на повышение точности и эффективности дифференциальных меридианных определений прямых восхождений путем применения различных методов обработки: классическим методом, методом Зверева – Положенцева и методом Извековых.

На протяжении 1970 – 1980 г.г. проводились наблюдения по международным программам: двойных звезд (DS), звезд высокой светимости (HLS), опорных звезд (RRS) в площадках с внегалактическими радиоисточниками (В. М. Кирпатовский, Л. С. Павленко, А. Ф. Ванцан). Продолжались работы по определению положений больших планет с целью уточнения их орбит и нуль-пунктов звездных каталогов (известна как программа «Орбита»), которые стали традиционными для ХАО (К. Н. Деркач, Н. Г. Зуев, К. Н. Кузьменко, В. Х.

Плужников, С. М. Гриценко, А. Ф. Ванцан, В. М. Кирпатовский, Л. С. Павленко).

Во всех этих программах советские астрометрические обсерватории, оборудованные в основном визуальными меридианными инструментами, изготовленными в XIX столетии, принимали самое активное участие. Большая активность советских астрометристов была даже отмечена создателями FK5, поскольку половина всех новых наблюдений для этого каталога была получена на советских обсерваториях.

В 1984 году прямо под павильоном меридианного круга была запущена в эксплуатацию вторая линия Харьковского метро. С этого момента серьезных наблюдений на меридианном круге не производилось, т. к. исследования показали, что во время прохождения поезда метро инструмент дрожит и не сохраняет свои элементы ориентировки.

В настоящее время в павильоне меридианного круга выполнены работы по переоборудованию этого помещения под Музей астрономии. И теперь уже очевидно, что свое 125-летие старый труженик – меридианный инструмент Репсольда в своем первоначальном виде встретит там, где его когда-то с большим уважением и любовью установили, но совершенно в другом качестве, а именно в качестве музейного экспоната.

Не менее важным практическим приложением астрометрии была созданная в 1920 – 1930 г.г. Харьковская служба времени. В 1926 г. в Харькове, в то время столице Украины, проходил съезд работников метрологии, на котором было решено организовать лабораторию времени при Харьковской палате мер и весов, в целях развития службы времени. Начало организации такой лаборатории относится к 1927 г. Организатором и идеологом этой работы был профессор Н. Н. Евдокимов, который оставался руководителем лаборатории времени с 1927 до 1936 г. Первыми сотрудниками лаборатории были Ю. Н. Фадеев, И. В. Гриненко и И. В. Баулин. Эталоном времени тогда был период обращения Земли вокруг своей оси.

С самого начала работы по службе времени в Харькове велись совместно Астрономической обсерваторией ХГУ и лабораторией времени при Харьковской палате мер и весов. Заведующим этой Службой был назначен Ю. Н. Фадеев, научный сотрудник Астрономической обсерватории, ученик профессора Н. Н. Евдокимова.

Подготовительные работы к выполнению основной задачи службы времени завершились только в 1933 г. Окончательное значение долготы Харькова для службы времени было выведено в 1932 г. Б. П. Остащенко-Кудрявцевым из украинского сравнения долгот. Тогда же были приобретены часы Рифлера, два комплекта из которых были установлены в подвале Палаты мер и весов и один – в подвале обсерватории. В 1928 г. для обсерватории приобретен и установлен переносной пассажный инструмент Бамберга (фирма Аскания Верке).

«Исторический» момент для Харьковской службы времени – день первой отправки в Пулковку сводок моментов радиосигналов относительно шкалы всемирного времени, наступил 16 ноября 1933 г. Вскоре Харьковская служба времени одной из первых в стране вошла со своими результатами в Международную службу времени – ВИН. Для приема радиосигналов времени лаборатория имела два радиоприемника; один для приема на длинных волнах, а другой на коротких. Основную наблюдательную работу по определению поправок часов проводил Ю. Н. Фадеев при непосредственном участии профессора Н. Н. Евдокимова. После окончания войны, с 1946 г. работу по службе времени продолжили Г. Р. Посошков и В. И. Туренко.

К 1950 г. под руководством Л. Д. Брызжева завершились работы, начатые еще перед войной, по созданию группового кварцевого эталона времени и частоты. Стабильность его хода была на 2 порядка выше, чем в последних маятниковых часах. Исследования работы этого кварцевого эталона времени и частоты за период времени 1954 – 1959 г.г., выполненные В. И. Туренко, показали, что он является одним из лучших в мире по точности, а по длительности непрерывной эксплуатации – единственным в мире. Эта работа позволила определить короткопериодическую неравномерность вращения Земли.

На рис. 2.10.1 представлена короткопериодическая составляющая неравномерности вращения Земли, полученная путем сравнения данных наблюдений, исправленных за вековую и долгопериодическую составляющие (UT1XC), и всемирного координированного времени, представляющего атомную шкалу (UTC). Данные за период 1956 – 1959 г.г. были впервые в мире получены В. И. Туренко с использованием кварцевых часов, ход которых был приведен к атомной шкале.

В результате дальнейших исследований была показана возможность определения сезонной неравномерности вращения Земли по астрономическим наблюдениям всемирного времени, выполненным Службой на базе кварцевого эталона времени. Впервые была получена «остаточная» кривая неравномерности вращения Земли, которая впоследствии

была отождествлена с долгопериодической и систематической неравномерностью вращения Земли и которую удалось получить только после привлечения к исследованию результатов наблюдений всех Служб времени Советского Союза.

В 1957 – 1959 г.г. Харьковская Служба времени принимала участие в программе Международного геофизического года (МГГ). Для выполнения этой программы был получен новый пассажный инструмент АПМ-1. Технические данные этого инструмента позволили Г. Р. Посошкову оснастить его фотоэлектрической установкой, что привело к повышению точности определения времени примерно в 3 раза.

В середине 60-х годов нашим сотрудником А. Д. Егоровым была выполнена существенная модернизация фотоэлектрической регистрации прохождения звезд через меридиан с использованием новой элементной базы, позволяющей расширить возможности фотоэлектрической установки для повышения степени автоматизации наблюдений и обработки павильонной информации. В 70-е годы А. Д. Егоровым была разработана интегральная фотоэлектрическая установка на основе записи сигнала от ФЭУ на магнитную ленту с дальнейшим анализом кривой фототока. На основе этих данных вычислялось наиболее вероятное значение момента прохождения звезды через визирную линию инструмента.

В эти же годы в практику работы Служб времени начали вводиться квантовые – цезиевые и водородные стандарты частоты, а затем и хранители. Коренной перелом в вопросах воспроизведения и хранения единицы времени произошел с введением секунды, определяемой с использованием внутриатомных процессов. Атомная секунда стала одной из основных единиц Международной системы СИ. Шкала времени, задаваемая с помощью атомных стандартов частоты и не зависящая от вращения Земли, получила название атомного времени TAI и была принята в 1967 г. на XIII Генеральной конференции по мерам и весам. В связи с этим, функции службы Всемирного времени переориентированы на определение параметров вращения Земли (ПВЗ), т.е. на создание базы для изучения вращения Земли и его неравномерности.

В период проведения международной программы MERIT (1983 – 1984 г.г.) Харьковская служба времени в составе В. И. Туренко, Н. Г. Литкевич, С. Р. Измайлова, Н. А. Поповской, В. Д. Симоненко и С. А. Степанова выполнила наблюдения около 7000 прохождений звезд. В течение 146 ночей определено 463 поправки часов. Все результаты были использованы международным центром сбора информации для выработки рекомендаций по созданию новой Международной службы вращения Земли.

После завершения проекта Hipparcos данные служб времени использовались для совмещения системы ICRF и оптической системы, задаваемой каталогом Hipparcos. Для этого сотрудниками Н. Г. Литкевич, Н. С. Олифер и Л. С. Павленко в системе каталога Hipparcos были проанализированы наблюдения 1973 – 1996 г.г. Полученные данные были отправлены в Астрономический институт АН Чешской республики для обработки в системе каталога Hipparcos. Эти наблюдения получили высокую оценку и были включены в глобальную обработку всех наблюдений Служб времени разных стран.

В настоящее время основной задачей Харьковской службы времени является определение разностей (UT0-UTC) из астрооптических наблюдений. Привязка этих наблюдений к шкале времени осуществляется при помощи эталона времени Харьковского института «Метрология». Точность харьковских наблюдений составляет примерно 40 миллисекунд, что близко к предельной точности данного метода. До 1988 г. объединенная Харьковская служба времени входила в Международную службу вращения Земли. В настоящее время она является пунктом астрооптических наблюдений в соответствии с Бишкекским соглашением от 09.10.1992 года.

Начавшееся в 1957 г. освоение космоса средствами ракетно-космической техники привело к созданию в этом же 1957 г. успешно действовавшей станции оптических наблюдений искусственных спутников Земли, которой руководил доцент В.Х. Плужников. Эта работа была начата в связи с необходимостью уточнения орбит ИСЗ под руководством Астрономического совета АН СССР. Наблюдателями были научные сотрудники, преподаватели и студенты кафедры астрономии. Основными наблюдательными инструментами сначала были созданные по заказу Астросовета трубки АТ-1, а затем – зенитные трубки ТЗК. Для решения некоторых геодезических задач и изучения тонких эффектов, связанных с полем тяготения Земли, и изменений плотности верхних слоев атмосферы необходимы были очень точные фотографические наблюдения движений спутников. В связи с этим в начале 1958 г. была

получена фотокамера НАФА-3С/25. Фотографические наблюдения были точнее визуальных.

С появлением ИСЗ геодезисты получили новый метод определения положений географических пунктов, так называемый метод космической триангуляции, реализуемый при одновременном наблюдении ИСЗ несколькими станциями. Первый пробный сеанс синхронных наблюдений был проведен в начале мая 1961 г. Наблюдения велись на четырех станциях (Пулково, Николаев, Ташкент и Харьков). Объектом наблюдений служил спутник «Эхо-1». Харьковская станция ИСЗ участвовала в синхронных наблюдениях с 1961 по 1965 годы. В наблюдениях ИСЗ в разное время участвовали Н. П. Барабашов, В. Х. Плужников, Э. Ф. Чайковский, В. И. Езерский, К. Н. Кузьменко, П. П. Павленко, Л. С. Павленко, Р. М. Шутьева, В. Н. Дудинов, Л. А. Акимов, К. Н. Деркач и многие другие сотрудники обсерватории и кафедры. Лучшими наблюдателями из студентов были Э. Г. Яновицкий, О. М. Стародубцева, Л. И. Бугаенко и некоторые другие.

С 1973 г. в нашей обсерватории начаты позиционные фотографические наблюдения избранных малых планет с помощью короткофокусного астрографа Цейсса, которые были завершены в 2000 году. Исследования астрографа и измерительных приборов УИМ-21 и КИМ-3 произвел П. П. Павленко. Он же выполнил почти 30-летний цикл наблюдений малых планет, результаты которых сейчас используются в ИПА РАН (бывший ИТА АН СССР) в рамках Международной коллективной программы примерно 2-х десятков обсерваторий. Цель этой работы – уточнение нуль-пунктов фундаментального звездного каталога и определение зонных ошибок фундаментальных каталогов. На этом же астрографе были успешно проведены наблюдения 12 комет.

Традиционно продолжались работы по наблюдениям покрытий звезд Луной и определению моментов времени этих покрытий, а также по наблюдениям затмений. Это коллективная работа для уточнения земного динамического времени (TDT), фигуры Луны и теории ее движения (К. Н. Деркач, В. М. Кирпатовский, В. С. Филоненко).

С 1997 г. в рамках международной программы по контролю и уточнению связи между оптической (Hipparcos) и радио (ICRF) системами координат, в которой принимали участие астрономы Украины, России, Турции, Китая и стран Восточной Европы, выполнялись ПЗС-наблюдения оптических компонент радиоисточников ICRF на телескопе АЗТ-8 (П. Н. Федоров, А. А. Мызников, В. С. Филоненко).

Длиннофокусные телескопы, оснащенные ПЗС-приемниками, позволяют наблюдать большинство слабых (16^m - 19^m) оптических компонент источников ICRF, но малые поля ($4'$ - $20'$) ограничивают возможности выполнения редукции наблюдений напрямую в систему Hipparcos из-за отсутствия слабых опорных звезд в этих площадках. Для корректного решения задачи необходимо было распространить систему Hipparcos на слабые звезды в окрестностях ICRF источников. Свой вклад в решение этой задачи внесли и харьковские астрометристы. В лаборатории астрометрии в 2002 – 2005 г.г. были проведены работы по созданию каталога положений и собственных движений слабых звезд вокруг источников ICRF в системе Hipparcos. Для создания каталога использовались оцифрованные на флагштафской станции USNO (США) изображения фотопластинок Паломарских обзоров POSS-I и POSS-II. Работа была завершена к концу 2005 г. созданием каталога XC1, распространяющего систему Hipparcos/Tycho2 на звезды до 20^m в градусных площадках вокруг источников ICRF северного полушария неба (П. Н. Федоров, А. А. Мызников). Высокая плотность опорных звезд этого каталога (рис. 2.10.2) в сочетании с высокой точностью положений и собственных движений позволяет теперь выполнять редукцию наблюдений даже в очень малых полях размером всего несколько угловых минут и, следовательно, получить параметры связи по положению и вращению между системами ICRF и Hipparcos/Tycho2 (рис. 2.10.3). Данные этого каталога также использовались для выполнения звездно-кинематических исследований в окрестности Солнца. Используя собственные движения каталога, были получены некоторые кинематические параметры нашей Галактики в окрестности Солнца размером порядка 1 килопарсека (П. Н. Федоров, А. А. Мызников, В. С. Ахметов).

В 2007 г. в лаборатории был создан новый каталог абсолютных собственных движений звезд. Для этого были скомбинированы данные каталогов USNO-A2.0 и 2MASS и получены абсолютные собственные движения около 300 миллионов звезд слабее 12^m , охватывающих всю небесную сферу за исключением небольшой зоны вблизи галактического экватора. Собственные движения были выведены из положений USNO-A2.0 и 2MASS Point Sources Catalog, с разностью эпох около 45 лет для звезд северного полушария и 17 лет для южного.

Абсолютизация выполнена с использованием около 1,6 миллиона галактик из 2MASS Extended Sources Catalog. Перед выводом собственных движений выполнялась коррекция зональных систематических ошибок, присущих каталогу USNO-A2.0. Средняя формальная ошибка абсолютизации меньше одной миллисекунды дуги в год. В каталоге приведены средние координаты звезд в системе ICRF на эпоху J2000, оригинальные абсолютные собственные движения и звездные величины B , R , J , H , K . Выполнено сравнение полученных собственных движений с данными других современных каталогов. Этот каталог (предварительное название XPM) в отношении собственных движений звезд реализует в оптическом диапазоне независимое приближение к инерциальной системе координат.

На основе линейной модели Огородникова-Милна получены предварительные значения компонент тензора вращения и тензора деформации из решения систем уравнений для звезд смешанного спектрального состава и для звезд с одинаковыми показателями цвета. В качестве примера на рис. 2.10.4 приведено поведение компоненты тензора вращения вокруг галактической оси Z в зависимости от звездной величины. При этом использовались только звезды слабее 14 звездной величины. Проведено сравнение численных значений этих параметров с аналогичными для различных современных каталогов.

Предложен способ исключения уравнения блеска из оценок собственных движений каталога на основе постоянства компоненты тензора вращения M_{-21} . Показано, что большинство современных каталоговотягощены уравнением блеска.

Подводя некоторый итог, можно сказать, что на протяжении примерно 100 лет астрометрия в Харьковской обсерватории, так же как и во всех астрометрических обсерваториях, была нацелена на решение важнейшей задачи астрометрии – создание инерциальной системы координат. В основном это достигалось с помощью меридианных и позиционных методов. На решение этой задачи затрачен колоссальный труд нескольких поколений астрономов, выполнено огромное количество наблюдений. Итогом этих усилий стали серии каталогов FK. Примерно до середины XX столетия наземная оптическая астрометрия была монополистом в решении фундаментальных задач астрометрии. Первый удар по этой монополии был нанесен в 60-х годах, когда во всеобщее употребление была введена шкала атомного времени. Формируемая астрометристами шкала Всемирного времени потеряла свое эталонное значение и стала использоваться для решения конкретной задачи – изучения неравномерности вращения Земли.

Появление РСДБ – следующий удар по монополии оптической астрометрии. Уже в 70-80-е годы XX столетия стало понятно, что прогресс в точности не отвечает требованиям как фундаментальной, так и прикладной науки. Поэтому в мире шли интенсивные поиски решения задачи по построению системы координат на основе других подходов.

Международная координатная система в радиодиапазоне потребовалась, прежде всего, для решения задач координатно-временного обеспечения космических полетов и определения параметров вращения Земли на новом уровне точности. Этот уровень не мог быть обеспечен средствами и методами классической оптической астрометрии, которыми располагали развитые страны и Советский Союз в то время. Поэтому ничего нет удивительного в том, что идея радиоинтерферометра для высокоточных координатно-временных определений появилась впервые именно в Советском Союзе. Такие наблюдения здесь были нужны, а высокий уровень теоретических работ в Советском Союзе всем известен. Удивительным является скорее то, что первая реализация этой идеи через два года после ее публикации была выполнена в Канаде. Откуда, к сожалению, следует, что уже в то время Советский Союз был отсталой в отношении высоких технологий страной по сравнению с западом. В дальнейшем эта отсталость проявилась в том, что советская наука никакого участия в РСДБ наблюдениях по созданию новой координатной системы в радио и оптическом диапазоне фактически не принимала.

Наблюдения небесных объектов с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами позволили создать новую небесную систему координат ICRF, которая опирается на 608 внегалактических радио объектов, движения которых в картинной плоскости наблюдений на протяжении, по крайней мере, 100 лет отсутствуют. Это новый шаг в создании инерциальной системы координат.

Аналогом ICRF системы в оптическом диапазоне стал каталог Hipparcos, реализованный с помощью космического проекта. В этом проекте советские астрометристы практически не принимали участия. Хотя теоретические работы в этой области были. По крайней мере, 3 проекта – «АИСТ», «ЛОМОНОСОВ» и «РЕГАТА-АСТРО» обсуждались неоднократно. В конце 80-х годов на Горной астрономической станции (вблизи Кисловодска) сотрудники Института

космических исследований даже проводили проверку приемников излучения (ПЗС-матриц), которые предполагалось установить на советском спутнике «РЕГАТА-АСТРО». Примерно в это же время на эту же станцию приезжал и Эрик Хег – главный идеолог и координатор проекта Hipparcos, где вместе с М. Чубеем, автором проекта «АИСТ», обсуждались перспективы развития совместного сотрудничества по обоим проектам. Вскоре наступил 1991 год, и советская астрометрия прекратила свое существование, а вместе с ней прекратила свое существование советская космическая астрометрия.

Заключение

Изначально целью этой работы было показать достижения и успехи харьковских астрометристов в XX веке. Ведь 100 лет срок немалый, и в течение этого времени было выполнено очень много различных исследований в Харьковской обсерватории. Однако, перечитывая эту работу, мне показалось, что она напоминает больше бухгалтерский отчет, чем рассказ о научных успехах. Да и были ли вообще крупные успехи? Астрометрия, по крайней мере, в первой половине XX века была рутинной наукой – астрометристы проводили наблюдения, создавали новые каталоги и улучшали значения астрономических постоянных; сенсационных открытий не было. Да и наука ли это? Может, это просто некий полезный процесс? Санкт-Петербургский астроном В. Витязев предложил методологию астрометрии символически изображать формулой

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\text{ПВСО})_n = \text{ПВСК},$$

где индексом n обозначена n -я реализация пространственно-временной системы координат (ПВСК), а ПВСО – пространственно-временная система отсчета. Эта формула говорит о том, что развитие астрометрии является процессом последовательных приближений.

А может быть, все намного проще, и связано с тем, что с конца XX века, когда Генеральной ассамблеей МАС была введена ПВСК, получившая название ICRS, вся предыдущая астрометрия стала представлять всего лишь исторический интерес? Мне не раз приходилось слышать подобный вопрос и отвечать на него. Кажущаяся простота основ астрометрии часто скрывает глубину этой науки. Возможно, это влияет на оценки достижений астрометрии. В XX веке была создана квазиинерциальная система координат не только для астрометрии, но и для физики как ее метрологическая основа. Разве это не успех? Система ICRF становится сегодня базой чисто астрофизических исследований. Это хорошо видно, поскольку 90 % научных публикаций, использовавших каталоги HIPPARCOS и TYCHO, посвящены не астрометрии, а астрофизике и галактической астрономии. О том, что это устойчивая тенденция, говорит и название самого мощного из проектов космической астрометрии – GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics).

Очевидно, что к концу XX века астрометрия сильно изменилась. И это связано с теми достижениями, которые были обеспечены несколькими поколениями астрометристов всего мира, включая харьковских ученых. Кто-то сделал вклад больший, кто-то меньший, но каждый по песчинке, по кирпичику складывал здание астрометрии XX века. Это тот случай, когда отдельных успехов не видно, а в целом наука успешна.

Эта статья была написана с использованием работ (Евдокимов, 1908, Сластенов, 1955, Александров, 1988, 1992, Туренко, 1974, Федоров и Мызников, 2006), а также на основании фактов, приведенных в рукописях и документах, сохранившихся в обсерватории.

2.11. ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

д.ф.-м.н. В. Н. Дудинов, к.ф.-м.н. В. С. Цветкова, В. Г. Вакулик, д.ф.-м.н. А. А. Минаков

От планет – к звездам ...

Датой рождения этого сравнительно молодого отдела можно считать, по-видимому, 1973 г., хотя формально статус отдела группа, руководимая ныне доктором физ.-мат. наук В. Н. Дудиновым, получила значительно позже, в то время как истоки тематики отдела относятся еще к началу 60-х годов. Шли годы, менялись объекты исследования, менялись методы и аппаратные средства, неизменным оставалось одно – стремление получить информацию о пространственной структуре объекта с предельно высоким разрешением. Как часто говорит руководитель отдела, мы всегда стремились увидеть на небе то, чего еще никто не видел...

В 1950 – 1960 г.г. в наблюдательной астрономии чрезвычайно возрос интерес к методам получения высокоинформативных изображений астрономических объектов при наблюдениях сквозь атмосферу. К этому времени стало понятно, что основным препятствием к получению высококачественных изображений является земная атмосфера, искажающая фронт световой волны от объекта, в результате чего увеличение диаметра телескопа приводит только к возрастанию собираемого светового потока, при этом разрешающая способность не увеличивается. К началу 70-х годов были изучены основные параметры земной атмосферы как среды, ответственной за искажения изображений астрономических объектов, и появились идеи, указывающие пути преодоления так называемого атмосферного предела разрешения.

Но в конце 60-х годов реализация этих идей была еще в будущем. А тогда были бурные дискуссии, стихийные семинары, на которые собирались не только сотрудники Астрономической обсерватории ХГУ, но и выпускники университета, работавшие в других учреждениях. Своим человеком в обсерватории стал сотрудник ИРЭ АН УССР Ю. В. Корниенко, выпускник радиофизического факультета В. А. Петров, ныне доцент ХИРЭ, и многие другие. Обсуждались самые разные темы – от эффекта Мессбауэра до поиска внеземных цивилизаций. Наиболее часто затрагиваемой темой было то, что вначале в иностранной литературе, а потом и в русскоязычной, получило название «проблемы видения сквозь турбулентную атмосферу». Успехи теории информации, достижения в области фильтрации радиотехнических сигналов, квантовой электроники, наконец, начало эры крупных телескопов и светоприемников нового поколения, поставивших проблему видения сквозь турбулентную атмосферу в ряд первоочередных задач наблюдательной астрономии, – все это создало стимулы и предпосылки для развития новых методов, позволяющих преодолеть атмосферный предел разрешения при наземных наблюдениях.

В мае 1970 г. должно было произойти довольно редкое астрономическое явление – прохождение Меркурия по диску Солнца. Здесь уместно пояснить, что наземные наблюдения Меркурия затруднены вследствие его близости к Солнцу, – вспомним известное изречение «счастлив астроном, увидевший Меркурий».

В ходе бурных дискуссий с участием сотрудников обсерватории Л. А. Акимова и В. Н. Дудинова и сотрудника ИРЭ Ю. В. Корниенко, длившихся зачастую далеко за полночь, родилась идея использовать это явление для уточнения размеров и формы диска Меркурия, применив методику измерения спектров мощности изображений с помощью когерентной оптики. К этому времени в одном из павильонов обсерватории уже была собрана первая когерентно-оптическая установка с гелий-неоновым лазером в качестве источника когерентного света. По первоначальному замыслу она предназначалась для работы по автоматизации анализа космических снимков лунной поверхности, выполнявшейся по заказу Института космических исследований АН СССР.

Поясним кратко, в чем состояла суть идеи наблюдения прохождения Меркурия. Предполагалось получить на нескольких инструментах огромное количество (несколько сотен тысяч) короткоэкспозиционных изображений диска Меркурия на фоне поверхности Солнца. Затем предполагалось использовать свойство тонкой сферической линзы при когерентном освещении формировать в фокальной плоскости преобразование Фурье от распределения амплитуд на ее апертуре. Меняя кадры с изображением объекта на входе устройства, можно было накапливать их Фурье-образы, получая в итоге оценку спектра мощности серии изображений. При этом использовался тот факт, что спектры мощности нечувствительны к случайным смещениям изображений, вызванным атмосферной турбулентностью, которые при длительных экспозициях вносят основной вклад в снижение разрешения полученного снимка. Кроме того, и из практики астрономических наблюдений, и из теоретических работ было известно, что в спектре мощности серии короткоэкспозиционных изображений содержится больше информации о тонкой пространственной структуре объекта, нежели в Фурье-

спектре одного изображения, полученного с экспозицией, эквивалентной суммарной экспозиции серии. Далее при обработке полученных спектров мощности предполагалось воспользоваться довольно мощной априорной информацией о характере объекта, а именно – идеально «черный» диск на идеально светлом фоне плюс априори абсолютно резкий край диска.

Проектом удалось заинтересовать академика А. Я. Усикова, занимавшего тогда пост директора ИРЭ АН УССР. Благодаря его поддержке и энтузиазму в реализацию проекта было вовлечено много людей в нескольких обсерваториях Союза. В Харькове на 70-см телескопе АЗТ-8 наблюдали сотрудники обсерватории Л. А. Акимов и О. М. Стародубцева. В ГАО АН УССР для наблюдений на 40-см горизонтальном солнечном телескопе поехали В. Н. Дудинов, А. Д. Егоров (АО ХГУ) и Ю. В. Корниенко (ИРЭ АН УССР). В Ташкент выехал В. Н. Уваров (ИРЭ). В итоге было отснято несколько километров киноплёнки, проявление которой оказалось отдельной проблемой, занявшей немало времени.

Можно понять нетерпение участников скорее подвергнуть отснятый материал обработке на когерентно-оптической установке. Однако уже первые попытки показали, что существующая установка, собранная «на скорую руку», несовершенна и нуждается в более аккуратном исполнении. В частности, оказалось, что подложка фотоплёнки содержит фазовые неоднородности, спектр Фурье которых искажает и полностью маскирует спектр обрабатываемого изображения. Стала понятной необходимость размещения плёнки в специальной кювете с иммерсионной жидкостью. Возникла проблема поиска подходящей иммерсионной жидкости и размещения в ней механизма протяжки плёнки. Наконец, стало понятно, что общепринятые требования к чистоте полировки оптических поверхностей и качеству стекла следует существенно повысить.

В итоге, как это часто бывает, когда нет возможности воспользоваться опытом предшественников, простой на первый взгляд замысел оказался сложной разработкой, сложной и в научном, и в инженерном плане.

Понятно, что такой оборот дела поставил молодых энтузиастов перед необходимостью как-то решить финансовую сторону дела. Астрономическая обсерватория ХГУ была мало-мощной организацией, поэтому пришлось снова обратиться к академику А. Я. Усикову, одной из характерных черт которого была способность с юношеским задором и энтузиазмом увлекаться новыми научными идеями. Он обещал оказать максимальную поддержку и предложил объединенной группе сотрудников ИРЭ и Астрономической обсерватории развернуть работы в помещении ИРЭ. В самом начале в нее вошли Ю. В. Корниенко, В. Н. Дудинов и В. С. Цветкова.

Здесь следует сделать небольшое отступление и напомнить, что это было время, когда продуктивность существовавших тогда электронных вычислительных машин (ЭВМ) значительно отставала от требований времени. Бытовало мнение, что их возможности, в частности быстродействие, приближаются к своему естественному пределу, обусловленному конечностью времени распространения электрических сигналов. Пессимизм относительно перспективности электронных вычислительных машин хорошо иллюстрирует приводимая ниже цитата, взятая из сборника статей зарубежных авторов «Оптическая обработка информации», переведенного на русский язык в 1966 г.: «Успехи в области оптических квантовых генераторов и волоконной оптики позволяют приступить к созданию «чисто оптических» цифровых вычислительных машин, быстродействие которых будет в десять – сто раз выше, чем у лучших современных электронных машин».

Если прибавить к этому отсутствие в то время цифровых матричных светоприемников и связанные с этим серьезные проблемы ввода информации в ЭВМ, становятся понятными и интерес к оптическим вычислительным устройствам, и возлагаемые на них надежды.

Возвращаясь к истории «операции Меркурий», отметим одно весьма существенное обстоятельство, носившее приметы того времени и определившее ее дальнейшее развитие. Несмотря на довольно плохое информационное обеспечение науки, характерное для того времени, было известно, что на западе интенсивно ведутся работы по развитию оптических методов и средств обработки информации. Было известно, что разработки когерентных оптических процессоров, предназначенных для обработки в реальном времени радиолокационных сигналов, ведутся еще с начала 50-х годов рядом крупнейших лабораторий и фирм США по контрактам с оборонными ведомствами. Известно было также, что на оптические когерентные процессоры на Западе возлагаются большие надежды по обра-

ботке больших массивов информации, поставляемых аэрофотосъемкой и искусственными спутниками Земли. Понятно, что по соображениям секретности технические подробности этих разработок в общедоступную научную литературу не поступали. Поэтому, когда в 1970 году в ИРЭ были развернуты работы по созданию когерентно-оптического процессора, пришлось все начинать «с чистого листа». Не было возможности опереться на существующие аналоги, на опыт предшествующих работ, не были известны подводные камни... Но одновременно была свобода от стереотипов мышления, неизбежно возникающих на проторенных научных дорогах. Как бы там ни было, к концу 1972 г. на 4 этаже нового здания ИРЭ АН УССР на ул. Академика Проскуры уже располагался уникальный когерентно-оптический процессор, предназначенный для обработки изображений и обладающий огромной по тем временам информационной пропускной способностью и низким уровнем когерентного шума.

Когда в 1974 г. вышла на русском языке монография К. Престона «Coherent optical computers», в которой были подробно описаны наиболее серьезные американские разработки, стало ясно, что отсутствие информации и ограниченность средств, как ни парадоксально, сослужили хорошую службу. Американские ученые пошли по пути создания дорогих многокомпонентных оптических объективов – и получили в итоге низкую точность вычислений, вызванную неприемлемо высоким уровнем когерентного шума. В харьковском процессоре когерентный шум был сведен к минимуму за счет существенного (в 8-10 раз и более) уменьшения числа оптических поверхностей – основных источников шума в когерентных процессорах. Это достигалось исключительно оригинальным решением оптической схемы процессора и конструкции его оптических элементов, которые выполняли одновременно две функции – иммерсионной кюветы и Фурье-преобразующего элемента. К тому же использование простейших сферических поверхностей с низкой светосилой существенно удешевляло устройство по сравнению с западными аналогами.

Как уже отмечалось выше, в 60-е годы существовала острая необходимость в оперативной обработке материалов космической и аэрофотосъемки. Возможности использовать для этого ЭВМ были ограничены отсутствием устройств считывания информации с первичных носителей и ввода ее в ЭВМ. Соответствующие организации готовы были платить большие деньги за выполнение их заказов, и естественно, возможности харьковского когерентно-оптического процессора не могли не привлечь их внимания. Однако известность и признание пришли не сразу. Вспоминается первый «выход в свет» на семинаре в Государственном оптическом институте в Ленинграде в конце 1972 г. В то время у них уже велись аналогичные работы, но благодаря лучшей информированности о состоянии дел на Западе (и лучшей финансовой обеспеченности), их сотрудники пошли по пути, проторенному западными учеными: многокомпонентные оптические элементы со сложными специально рассчитанными поверхностями, та же оптическая схема и, как следствие, – неприемлемо высокий уровень собственного шума процессора и высокая стоимость. Доклад В. Н. Дудинова о параметрах харьковского процессора вызвал вначале недоверие, затем растерянность. Потом начали спрашивать, разбираться... В конце концов оценили.

Вот как случилось, что первоначальный замысел «операции Меркурий» вылился, по сути, в крупную инженерно-техническую разработку, в ходе которой несколько сместился и центр тяжести научных интересов группы. Этому способствовал и тот факт, что к моменту завершения харьковского когерентно-оптического процессора актуальность работы по измерению размеров и формы диска Меркурия заметно снизилась благодаря успешной американской космической миссии к этой планете. К тому же простая на первый взгляд методика утонула во множестве мелких, но достаточно неприятных технических проблем, из-за которых было решено отложить завершение «операции Меркурий».

Однако в 1972 году о ней пришлось вспомнить, но уже в совершенно другом аспекте. Кто-то из сотрудников ИРЭ увидел статью французского астронома А. Лабейри, вышедшую еще в 1970 г., в которой был предложен так называемый метод спекл-интерферометрии, реализующий в условиях наземных наблюдений дифракционный предел разрешения крупных телескопов. Достаточно было беглого взгляда на эту статью, чтобы узнать в предложенном А. Лабейри методе идею, лежащую в основе замысла по измерению параметров диска Меркурия. Авторам «операции Меркурий» не хватило самой малости – показать, что при коротких экспозициях (0,01 секунды и меньше) изображение астрономического объекта содержит информацию вплоть до дифракционного предела разрешения используемого телескопа. В этой первой работе А. Лабейри даже методика обработки исходных снимков была такой же, как предполагалось при выполнении «операции Меркурий», – спектр

мощности серии изображений получался с помощью когерентно-оптического спектроанализатора.

Можно представить себе чувства тогдашних участников этих событий. Появилось естественное желание как минимум повторить работу Лабейри. Было понятно, что есть возможность выполнить измерения спектров мощности на более высоком уровне, так как в то время уже был готов спектроанализатор, который по своим параметрам превосходил тот, который использовал Лабейри, – это было ясно из приводимых в его статье изображений спектров мощности. Однако простые расчеты показали, что нет возможности получить соответствующий наблюдательный материал, – нет надлежащих светоприемников, нет телескопов достаточно большого диаметра. Советский 6-метровый телескоп тогда еще не был введен в эксплуатацию. Пришлось работу по спекл-интерферометрии звезд отложить до лучших времен. Прошло несколько лет, прежде чем это стало возможно, но об этом – чуть позже.

А пока пришлось заняться обработкой изображений более близких объектов. В 1972 г. советский космический аппарат «Марс-3» передал на Землю первые изображения поверхности Марса, полученные с помощью оптико-механического сканера. Качество изображений было низким как по чисто техническим причинам, так и вследствие низкого контраста поверхности из-за разыгравшейся в это время на Марсе глобальной пылевой бури. Полученные изображения были предоставлены для обработки в несколько организаций. Сотрудниками ИРЭ АН УССР и Астрономической обсерватории В. Н. Дудиновым, В. С. Цветковой и В. А. Кришталем была проведена огромная и весьма трудоемкая работа по «спасению» почти безнадежно испорченных снимков участков поверхности Марса. Результаты работы нашей группы среди попыток других коллективов были представлены в 1973 г. на конференции в Киеве, где они получили высокую оценку заказчика – Научно-исследовательского института приборостроения Министерства общего машиностроения (НИИП МОМ), разработчика оптико-механических сканеров. В результате с НИИП была достигнута договоренность о заключении хоздоговора на обработку материалов следующих космических миссий к красной планете, которые планировались в ближайшие годы.

Появилось приличное финансирование, которое позволило перенести работы по когерентно-оптической обработке космических изображений на загородную наблюдательную станцию Астрономической обсерватории. Целесообразность такого шага была обусловлена тем, что на новом месте когерентно-оптический процессор можно было расположить в цокольном этаже лабораторного корпуса, где он был полностью изолирован от техногенных источников вибраций и где можно было существенно уменьшить турбулентность воздуха на пути распространения пучка когерентного света.

К концу 1973 г. первый действующий макет когерентно-оптического процессора АО ХГУ был собран. В 1974 – 1978 г.г. проводилось его совершенствование и исследование, и одновременно выполнялись различные работы, связанные с обработкой изображений по заказам различных организаций. В эти годы далеко не всегда удавалось выбрать тематику хоздоговорных работ, которая была бы максимально близка к научным интересам группы (а это была все та же проблема видения сквозь турбулентную атмосферу), но особенно перебирать не приходилось. Чтобы оставаться на должном уровне, нужны были большие средства на оборудование, материалы, возникла необходимость в довольно многочисленном обслуживающем персонале, потребовались дополнительные научные кадры. Тематика хоздоговорных работ в эти первые годы была весьма широкой – от медицины (обработка рентгенограмм) и криминалистики (автоматизация дактилоскопических исследований) до обработки космических и аэрокосмических изображений. Из наиболее интересных законченных исследований отметим создание на базе процессора когерентно-оптического коррелятора – устройства для отождествления заданных деталей на фоне сложных сцен (Дудинов и др., 1977, Дудинов и Жилкин, 1978), разработку методики измерения спектров мощности оптических изображений (Александров и др., 1976, Дудинов и др., 1979), разработку методики линейной фильтрации и ее выполнение при решении широкого круга задач обработки оптических изображений, от обработки изображений астрономических объектов и повышения дешифрируемости космических и аэрофотоизображений поверхности Земли (Дудинов и др., 1974, Дудинов и др., 1977 а,б, Дудинов и Цветкова, 1981, Цветкова и Черный, 1984) до обработки наземных изображений искусственных спутников Земли. Результаты работ по восстановлению изображений ИСЗ по соображениям секретности, естественно, в открытой печати представлены никогда не были. Приведем одно из «несекретных» изображений объектов ближнего космоса (орбитальный комплекс «Мир-

Атлантис»), обработанное в 1995 г. по методике, разработанной В. Г. Вакуликом (рис. 2.11.1).

Хотелось бы также упомянуть работу по изучению статистики волнения моря, выполненную ныне покойным В. А. Кришталем по заказу очень закрытого предприятия. Цель работы – выяснить возможность обнаружения следов подводных лодок по вносимым ими возмущениям в характер волнения морской поверхности. Головной заказчик от результатов работы был в восторге. Результатом явилась успешная защита кандидатской диссертации одним из представителей Заказчика и создание у них точной копии нашего процессора. Кстати, годом или двумя раньше полный аналог нашего процессора был установлен в ЦКБ «Спектр» (Москва). Что же касается защиты диссертаций по нашей тематике, то наблюдается забавный баланс: наши сотрудники защитили две кандидатские диссертации и одну докторскую, и столько же диссертаций (и такого же ранга) защитили на материалах наших отчетов наши заказчики.

Отдельно отметим огромную работу по фильтрации панорам Марса, полученных в феврале 1974 г. советскими АМС «Марс-4» и «Марс-5». (Дудинов и др., 1980). Снимки, переданные на Землю по каналам связи, содержали различные помехи, которые снижали научную ценность результатов этой космической миссии, затрудняя морфологический анализ изображений поверхности красной планеты. С поставленной Заказчиком (НИИП МОМ) задачей, состоящей в устранении помех и повышении дешифрируемости полученных изображений, наша группа успешно справилась. Одновременно с нами повышением качества панорам поверхности Марса занималось несколько других групп – в Институте проблем передачи информации (Москва), в ГАО АН УССР (Киев) и в ИРЭ АН УССР. В этих институтах применялись уже цифровые методы обработки, эффективность которых в начале 70-х годов начала стремительно расти. Результаты «спасательных работ» по повышению дешифрируемости панорамных изображений красной планеты, выполненные всеми перечисленными коллективами, представлены в сборнике «Поверхность Марса», опубликованном в 1980 г. издательством «Наука» (Дудинов и др., 1980). На рис. 2.11.2 приведен фрагмент панорамного изображения поверхности Марса до обработки (а) и после устранения случайных и периодических помех (b).

До 1975 г. с когерентно-оптическим процессором АО ХГУ наиболее активно работали под руководством В. Н. Дудинова сотрудники НИЧ университета В. А. Кришталю, Л. Ф. Шпилинский, А. Н. Гуренко, В. С. Цветкова, Н. П. Стадникова, выполнившие большую работу по созданию, наладке и исследованию (Дудинов и др., 1974, 1976а,б, 1977а,б). В 1975 г. были приняты на работу в качестве научных сотрудников выпускники кафедры астрономии ХГУ В. Г. Черный и С. Г. Кузьменков, и с тех пор, вплоть до окончания эпохи перестройки и начала развала экономики, наш научный коллектив пополнялся в основном за счет выпускников кафедры астрономии. В 1978 г. был зачислен на работу В. В. Коничек, в 1980 г. – В. Г. Вакулик, в 1983 г. – А. П. Железняк и в 1986 г. – Е. А. Плужник. Первым боевым крещением для В. В. Коничека и В. Г. Вакулика была спекл-интерферометрия, ей посвящены их дипломные работы. А. П. Железняк выполнил отличную дипломную работу по измерению коэффициента корреляции мгновенных изображений компонентов двойных звезд с помощью когерентного коррелятора. В 1977 г. к нам из радиофизического факультета университета перешел к.ф.-м.н. В. Д. Бахтин, а в 1980 г. наш коллектив пополнился талантливым инженером И. Е. Синельниковым, благодаря которому существенно расширились наши возможности по изготовлению приборов. Повторимся, что финансирование велось почти исключительно за счет большого объема хозяйственных работ, поэтому новые люди зачислялись в штат научно-исследовательской части (НИЧ) университета.

В эти годы спрос на наши работы среди потенциальных заказчиков был весьма велик, и поэтому у нас всегда была возможность выбирать хозяйственную тематику таким образом, чтобы одновременно удовлетворять свои научные интересы. В 1977 г. появилась возможность начать спекл-интерферометрию звезд на советском 6-метровом телескопе. В этом деле огромную моральную поддержку нам оказал академик С. Я. Брауде, который, в сущности, инициировал работу. В то время он активно занимался созданием Радиоастрономического института АН УССР и рассматривал возможность включения нашего коллектива в состав института. Его в особенности привлекли возможности когерентно-оптического процессора для обработки сигналов декаметровых телескопов с целью использования их в режиме интерферометра. В силу ряда причин сотрудничество в этом направлении дальше общих обсуждений не пошло, но вот для наших работ по спекл-интерферометрии С. Я. Брауде может по праву считаться крестным отцом. Первая наша работа по спекл-интерферометрии

звезд на БТА была представлена им в Докладах Академии наук СССР в 1979 г. (Дудинов и др., 1979). Были выполнены измерения угловых диаметров звезд-гигантов α Ori и α Boo, которые составили, соответственно, $0,043'' \pm 0,004''$ и $0,018'' \pm 0,004''$ на эффективной длине волны 660 микрон (Дудинов и др., 1980, Dudinov et al., 1982). До наших работ существовало три измерения диаметров этих звезд, выполненных методом спекл-интерферометрии в более коротковолновом диапазоне. Несмотря на использование зарубежными коллегами современных светоприемников и цифровой методики обработки (у нас спекл-изображения регистрировались непосредственно на фотопленку и обработка велась на когерентно-оптическом процессоре), наши результаты по точности им нисколько не уступали.

С тех пор спекл-интерферометрические наблюдения на 6-метровом телескопе велись регулярно: два раза в год мы посылали заявки на наблюдательное время и почти всегда его получали. С марта 1979 года наблюдения велись со спекл-камерой, включающей усилитель яркости УМ-92 с магнитной фокусировкой, а в 1981 году в нашем распоряжении появился трехкамерный ЭОП с фокусирующей системой на постоянных магнитах. Все работы велись совместно с сотрудниками Специальной Астрофизической обсерватории В. С. Рыловым и В. Н. Ерохиным. От нашей группы в наблюдениях и обработке участвовали В. Н. Дудинов, С. Г. Кузьменков, В. В. Коничек, В. С. Цветкова. В течение 1977 – 1981 г.г. были получены километры аэрофотопленки со спекл-изображениями звезд-гигантов и тесных двойных и кратных звездных систем, обработка которых выполнялась на когерентно-оптическом спектроанализаторе и была закончена только в 1984 – 1985 г.г. (Дудинов и др., 1986, Кузьменков, 1986). Причина столь низкого темпа обработки – в ее чрезвычайной громоздкости: проявление первичных снимков со строгим соблюдением фотометрического режима, изготовление позитивных копий – также с соблюдением необходимого режима проявления, затем размещение позитивной копии в иммерсионной кювете на входе спектроанализатора (обычно порядка 300 кадров) и, наконец, накопление квадратов спектров на фотопластинке в выходной плоскости спектроанализатора (снова-таки с тщательной фотометрической калибровкой). На рис. 2.11.3 приведено характерное спекл-изображение опорной (неразрешаемой) звезды, полученное на 6-м телескопе БТА, а на рис. 2.11.4 a,b – примеры спектров мощности спекл-изображений двойных звезд ADS175 AB (расстояние между компонентами $0,147''$) (a) и 26 Aug, расстояние $0,082''$ (b).

Окончательная обработка фотоснимков со спектрами мощности производилась уже в относительно комфортных кабинетных условиях с помощью микрофотометра. Всего было выполнено 42 измерения угловых разделений и позиционных углов для 28 двойных звезд, в том числе система ϕ Dra была впервые измерена методом спекл-интерферометрии, а система ADS 11149 была впервые идентифицирована как тройная. Итоги всей работы опубликованы в ряде публикаций, основные из которых указаны выше. Основной объем работ был выполнен С. Г. Кузьменковым (в настоящее время – декан физического факультета Херсонского университета), который в 1986 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию по спекл-интерферометрии звезд на БТА. Несколько большие по объему и аналогичные по точности измерения были выполнены в эти же годы Мак-Алистером, который использовал существенно более удобные и совершенные матричные светоприемники, о которых тогда в Союзе можно было только мечтать.

К сожалению, несмотря на успешное развитие работ по спекл-интерферометрии, в силу ряда причин интенсивность наблюдений на БТА после 1981 г. снизилась. Во-первых, в CAO к этому времени сформировались группы с научными интересами, ориентированными на наблюдения весьма слабых объектов и привлекательными для зарубежных наблюдателей. Как следствие, возросло влияние сотрудников CAO на комитет по распределению времени на крупных телескопах Союза. Во-вторых, в CAO появилась конкурирующая группа, возглавляемая Ю. Ю. Балегой, которой удалось получить в свое распоряжение более современную зарубежную спекл-камеру, использующую светоприемник нового поколения. Наконец, новый усилитель яркости на постоянных магнитах, который появился в 1981 г., не оправдал возлагаемых на него надежд. Полученные с его помощью спекл-изображения имели неожиданно высокий уровень шума, что существенно затрудняло их обработку с помощью когерентно-оптического процессора, который эффективен только при выполнении линейной фильтрации. Уже для этой задачи возникла необходимость в применении цифровых методов обработки, которыми мы в то время не располагали, и поэтому было принято решение отложить обработку этих спекл-интерферограмм до лучших времен, которые, увы, так никогда и не наступили, по причинам как субъективного, так и объективного характера.

В силу названных выше обстоятельств, после 1982 г. получать наблюдательное время на БТА стало все труднее и труднее. Если раньше мы регулярно имели как минимум два наблюдательных сета в год, то после 1982 г. время выделялось далеко не каждый год. Разумеется, это было досадно, но одновременно создавало благоприятные условия для завершения обработки уже полученного материала и осмысливания ее результатов. Помимо чисто астрономического выхода (измерения угловых диаметров звезд-гигантов и позиционные измерения двойных и кратных звезд), наши работы по спекл-интерферометрии имели весьма полезный побочный продукт в виде исследований статистических свойств земной атмосферы как среды, искажающей наземные телескопические изображения. В конце 70-х – начале 80-х годов эта проблема приобрела чрезвычайную актуальность в связи с известной программой звездных войн и с разработкой и созданием (не у нас, а за рубежом) телескопов с адаптивной и активной оптикой. Было известно, что США интенсивно развивают средства для наземных наблюдений искусственных спутников Земли. Ходили слухи о фантастических успехах американцев в этом направлении. Естественно, Советский Союз не мог остаться в стороне. У нас также начали создаваться специальные комплексы для наблюдений ИСЗ. Так как при получении изображений ИСЗ можно было использовать только чрезвычайно короткие экспозиции, наш опыт по спекл-интерферометрии звезд оказался востребованным оборонными предприятиями страны. Сотрудничество оказалось взаимно выгодным: нам – вполне пристойное финансирование и астрономический выход, заказчикам – методика получения хороших изображений ИСЗ, ее обоснование и демонстрация возможностей на примере изображений астрономических объектов и в применении к реальным изображениям космических объектов.

Отработку методики получения высококачественных изображений ИСЗ было удобно проводить по малоразмерным объектам Солнечной системы – малым планетам и некоторым из больших планет, которые по своей поверхностной яркости и угловым размерам могут быть почти полными аналогами ИСЗ. Оставалась также актуальной спекл-интерферометрия двойных звезд на телескопах умеренного размера, которая, кроме чисто астрономического выхода, обеспечивала информацию о так называемой зоне изопланатизма искажений, вносимых атмосферой, по поводу размеров которой в те времена существовали заметные расхождения. Наш опыт спекл-интерферометрии на БТА позволял утверждать, что существующие оценки размеров области изопланатичности являются несколько пессимистическими. Между тем этот вопрос имел принципиальное значение для оценки перспектив развития методов видения сквозь турбулентную атмосферу. Было чрезвычайно важно проверить это при наблюдениях реальных объектов.

Для выполнения этих работ в 1983 г. был приобретен электронно-оптический преобразователь УМ-92, и силами сотрудников Астрономической обсерватории ХГУ В. Д. Бахтина, В. Г. Вакулика, А. П. Железняк, В. В. Коничека, И. Е. Синельникова и С. А. Степанова была создана спекл-интерферометрическая камера, с помощью которой были начаты на 70-см телескопе АЗТ-8 наблюдения широких звездных пар (Бахтин и др., 1987). Проведенные исследования показали, что метод спекл-интерферометрии можно успешно применять при наблюдениях двойных звезд с разделениями, по крайней мере, до 30", что существенно расширяло возможности этого метода и позволяло рассчитывать на точность измерений таких угловых разделений в несколько тысячных угловой секунды. Однако для достижения такой точности необходимо было существенно уменьшить погрешность измерения масштаба в фокальной плоскости светоприемника. Для устранения этого основного источника ошибок спекл-интерферометрии было разработано и изготовлено специальное устройство прецизионного определения масштаба (Бахтин и др., 1988).

В конце 1983 г. к нам обратились сотрудники Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузинской ССР с предложением развернуть у них работы по спекл-интерферометрии двойных и кратных звезд в применении, в частности, к системам разлетающихся звезд типа Трапеции Ориона. Предложение показалось чрезвычайно интересным, и за работу с энтузиазмом взялись В. В. Коничек и В. Д. Бахтин. Уже в конце 1984 г. они установили на телескопе АЗТ-11 Абастуманской астрофизической обсерватории спекл-камеру с четырехкамерным электронно-оптическим преобразователем УМ-93 и выполнили первые наблюдения. К концу 1987 г. на телескопе АЗТ-11 был смонтирован комплекс аппаратуры для прецизионных измерений расстояний между компонентами широких звездных пар, включающий устройство прецизионного измерения масштаба, и выполнены его исследования. Можно было начинать регулярные наблюдения. Но в это время уже начался процесс

дезинтеграции Советского Союза. В 1988 г. в Грузии произошли первые беспорядки. Тем не менее, В. В. Коничек и В. Д. Бахтин пытались продолжать успешно начатую работу даже после Беловежских событий, когда к политическим беспорядкам добавился финансовый коллапс, нанеший невосполнимый урон науке во всех без исключения республиках бывшего Союза. Их последний визит в Грузию состоялся в 1993 г.

Но вернемся к 80-м годам, когда мы интенсивно занимались проблемой получения высококачественных изображений ИСЗ и когда хоздоговорных денег хватало и на обслуживание заказчиков, и на удовлетворение своих научных интересов. Как уже упоминалось, отработку методики получения изображений ИСЗ было удобно проводить по объектам Солнечной системы.

В 1981 – 1982 г.г. у нас установились тесные научные связи с группой С. Б. Новикова из Государственного астрономического института им. Штернберга, который в это время уже имел на горе Майданак в Узбекистане наблюдательную базу, оснащенную несколькими телескопами. Интенсивно велись работы по монтажу 1,5-м телескопа АЗТ-22, предназначенного именно для получения астрономических изображений высокого качества. Его оптика должна была иметь практически дифракционное разрешение, башня и купол были снабжены специальной системой терморегуляции и вентиляции для максимального снижения влияния на качество изображений подкупольного и околокупольного пространства.

В лице С. Б. Новикова и его сотрудников мы нашли единомышленников и соратников по проблеме, которая в равной степени волновала их и нас. Они знали, как обеспечивать максимально высокое качество при получении исходных изображений, и имели соответствующие инструменты. У нас было к этому времени чем регистрировать изображения (мы имели спекл-камеры на базе ЭОП) и был опыт и средства улучшения качества полученных изображений. Сотрудничество получилось взаимно выгодным и вылилось в ряд совместных исследований и совместных публикаций (Дудинов и др., 1987, 1989, Вакулик и др., 1989, Дудинов и др., 1990, Dudinov et al., 1990, Tsvetkova et al., 1991 a,b, Вакулик и др., 1990).

Наиболее интересная работа этого периода связана с наблюдениями астероида 4 Веста в оппозицию 1988 г. На 1-м телескопе, установленном на горе Майданак, с помощью спекл-камеры на базе трехкамерного ЭОП были получены серии короткоэкспозиционных изображений этой малой планеты. Выполнены классические спекл-интерферометрические измерения, позволяющие по измеренным спектрам мощности определить с дифракционным разрешением угловой диаметр объекта с использованием разумной модели распределения яркости по ее диску. Продемонстрированы характерные ошибки классического варианта спекл-интерферометрии в случае, когда реальный вид объекта значительно отличается от использованной модели. Поэтому основные усилия были направлены на разработку методов синтеза дифракционных изображений диска Весты из данных спекл-интерферометрии. К этому времени было предложено несколько методов решения этой задачи, но все они требовали применения цифровых методов обработки, которыми мы в то время еще не располагали. Так как исходные спекл-интерферограммы были зарегистрированы все еще на фотографическом носителе, наиболее «узким» местом было представление их в цифровом виде для последующего ввода в ЭВМ. Поэтому вначале был использован метод восстановления, допускающий использование аналоговой техники, – так называемый метод сдвига и суммирования. Он основан на предположении, что каждое изолированное, превалирующее по яркости пятно в спекл-изображении можно рассматривать как дифракционное изображение объекта. Метод применим для случая, когда размер объекта не намного превосходит размер дифракционного изображения звезды. Именно этим методом были восстановлены первые изображения диска Весты с дифракционным разрешением 1-метрового телескопа, равным $0,13''$ (Вакулик и др., 1989, Tsvetkova et al., 1991a,b).

Параллельно Е. А. Плужник под руководством В. Н. Дудинова разрабатывал новый оригинальный метод восстановления из спекл-данных дифракционно ограниченных изображений объекта с использованием экспоненциальных множителей, требующий для своей реализации применения цифровой техники. Основные положения метода изложены в статье 1988 г. (Дудинов и Плужник, 1988), результат же его применения к реальным спекл-изображениям был получен и опубликован значительно позже (Вакулик и др., 1994, Дудинов и др., 1994). Причина такой задержки – уже упоминавшееся отсутствие устройства сканирования исходных серий, необходимого для оцифровки большого количества кадров (не менее 100) для последующего ввода в ЭВМ. В 1985 г. такое устройство, созданное в ГАО АН УССР под

руководством В. Г. Парусимова, уже функционировало, но было чрезвычайно загружено. Только в конце 80-х годов Е. А. Плужнику удалось получить время и просканировать спекл-интерферограммы.

На диске Весты, восстановленном методом экспоненциальных множителей (рис. 2.11.5), отмечаются детали, похожие на детали изображения, восстановленного аналоговым методом «сдвиг-и-сумма» с использованием того же наблюдательного материала, однако качество восстановления бесспорно лучше (более четкий край диска, выше отношение сигнал/шум). Несколько позже Космический телескоп Хаббла получил очень похожее изображение при близкой фазе вращения. Работа Е. А. Плужника явилась основательным вкладом в решение так называемой фазовой проблемы в оптике, и в 1996 г. он блестяще защитил кандидатскую диссертацию. В дальнейшем Е. А. Плужник, оставаясь сотрудником нашего отдела, много и плодотворно работал в области спекл-интерферометрии звезд в Специальной Астрофизической обсерватории РАН, где его талант астрофизика-теоретика был по достоинству оценен. В настоящее время Е. А. Плужник работает на телескопе Кек (Гавайи).

Из других работ, выполненных в 80-х годах совместно с хозяевами Майданака, можно упомянуть новые данные по структуре околоядерной зоны галактики NGC 1275, свидетельствующие о том, что имеет место взаимодействие двух галактик (Дудинов и др., 1990, Dudinov et al., 1990). По материалам спекл-интерферометрии на 1-метровом телескопе выполнено восстановление методом спекл-голографии двух тесных компонентов тройной системы ζ Спс, расстояние между которыми составляет около половины угловой секунды (Дудинов и др., 1994). В ноябре-декабре 1985 г. – совместное участие в кампании международного мониторинга кометы Галлея «International Halley Watch». Обработка позволила существенно повысить точность позиционных измерений и проследить за динамикой быстрых процессов в околоядерной зоне кометы (Дудинов и др., 1989). Богатейший материал по динамике облачных образований в атмосфере Юпитера был собран в середине 80-х годов на Майданаке В. Г. Черным (1986). Во время противостояния Марса в декабре 1992 г. были получены с помощью ЭОП серии изображений в трех фильтрах. Их обработка, выполненная уже с применением цифровых методов, позволила получить цветные изображения красной планеты с разрешением, составившим достойную конкуренцию аналогичным изображениям, полученным примерно в то же время Космическим Телескопом им. Хаббла. К сожалению, мир об этом не узнал, так как наш результат был опубликован с заметным опозданием, и к тому же в малоизвестной за рубежом «Кинематике и физике небесных тел» (Дудинов и др., 1994). Для нас, однако, эти великолепные картинки являются знаковыми, так как с них можно вести исчисление нашего перехода к цифровым методам обработки астрономических изображений: в 1992 г. В. Г. Вакулик, А. П. Железняк, В. В. Коничек, Е. А. Плужник и И. Е. Синельников вместе с сотрудником другого отдела В. В. Корохиным создали быстрый микрофотометр на базе ПЗС-линейки, предназначенный для быстрого ввода фотографических изображений в ЭВМ (Вакулик и др., 1994). С его помощью были просканированы изображения Юпитера, полученные на Майданакском 1,5-метровом телескопе во время падения фрагментов кометы Шумейкера-Леви 9 (Dudinov et al., 1995), приведенные на рис. 2.11.6.

Но как стремителен в нашу эпоху технический прогресс! Уже в 1995 г. необходимость в микрофотометре, сканирующем фотографические изображения для их последующего ввода в ЭВМ, практически отпала. В распоряжении астрономов стали появляться ПЗС-камеры, стали доступны персональные компьютеры с параметрами, о которых раньше нельзя было даже мечтать. Свои первые наблюдения с ПЗС-камерой Pictor-416 (кстати, камера любительская) мы провели в 1995 г., но это уже начало совершенно другой истории.

Сейчас когерентно-оптический процессор АО ХГУ, занесенный в реестр объектов, составляющих национальное достояние Украины, живет новой жизнью, совершенно отличной от той, с которой он начинался. В свое время, когда возможности электронной вычислительной техники были весьма ограничены, он был незаменим при получении высококачественных изображений астрономических объектов, и благодаря ему нам удалось выполнить ряд действительно красивых исследований, среди которых и спекл-интерферометрия звезд на 6-м телескопе БТА, и дифракционные изображения Весты, и обработанные панорамы Марса, и многое другое, о чем речь шла выше. Но в этом кратком рассказе не затронуто еще одно чрезвычайно важное свойство процессора, которое не нашло отражения и в наших публикациях. Это – возможность с его помощью быстрой и

наглядной иллюстрации и моделирования практически любых явлений, связанных с электромагнитными свойствами излучения. Его роль в углублении фундаментальных физических знаний студентов (да и начинающих научных сотрудников) трудно переоценить. Один день «игры» с когерентно-оптическим процессором заменяет месяцы обучения студентов многим непростым научным истинам, и именно поэтому заведующий кафедрой астрономии А. М. Грецкий каждый год часть времени летней практики студентов-астрономов посвящает их знакомству с процессором.

В заключение отметим, что в 1986 г. за цикл работ по аналоговой и цифровой технике обработки астрономических изображений четыре сотрудника Астрономической обсерватории – В. Н. Дудинов, В. С. Цветкова, Д. Г. Станкевич и Ю. Г. Шкуратов вместе с тремя сотрудниками из ИРЭ АН УССР и ГАО АН УССР были удостоены Государственной премии УССР.

... и дальше – к галактикам и квазарам

Бурное развитие вычислительной техники стимулировало развитие новых, более эффективных нелинейных методов восстановления изображений. Результаты по Весте (рис. 2.11.5), падению на Юпитер кометы Шумейкер-Леви 9 (рис. 2.11.6), великолепные изображения Марса (рис. 2.11.7) были получены уже с использованием цифровых методов обработки изображений.

Успешное применение методов наблюдения с высоким угловым разрешением к объектам Солнечной системы (планеты и астероиды) и галактическим объектам (спекл-интерферометрия звезд-гигантов) стимулировало естественное желание заглянуть подальше. Марс, Юпитер, Веста, галактические объекты, звезды-гиганты, что дальше? А дальше – другие галактики.

Ядра активных галактик – достаточно динамичные объекты, как правило, со сложной пространственной структурой – стали новыми объектами применения методов обработки изображения, развиваемых в отделе. Как оказалось, это был очередной этап перехода к исследованию самых удаленных объектов Вселенной – квазаров.

Теоретические работы по исследованиям эффектов гравитационного линзирования, появившиеся вновь в печати в конце 60-х – начале 70-х годов, не вызвали у нас особого интереса. И даже сообщения о возможности наблюдения «гравитационных космических миражей» – причудливых искажений изображений удаленных космологических объектов гравитационными полями более близких галактик, не вызвали доверия. Для многих из нас, вначале, это сообщение показалось очередным «открытием» теоретиков, представляющим скорее чисто академический интерес. Однако в 1979 г. теоретические предсказания получили блестящее подтверждение – появилось сообщение о наблюдении первого гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 [1]. В последующие годы открывается еще несколько гравитационно-линзированных квазаров (ГЛК). Становится очевидным, что открыт новый тип астрономических объектов – «гравитационные линзы», для исследования которых необходимы наблюдения с высоким угловым разрешением. Непривычное сочетание слов – «гравитационная» – что-то из области строгой теории с интегралами и тензорами, и такое знакомое и понятное для экспериментаторов и наблюдателей – «линза», не могло не привлечь наше внимание. Проблема гравитационного линзирования становится темой, широко обсуждаемой на семинарах и в личных беседах сотрудников отдела методов обработки изображений.

Первые теоретические исследования эффекта гравитационной фокусировки в бывшем СССР были начаты П. В. Блюхом и А. А. Минаковым в отделе распространения радиоволн и ионосферы ИРЭ АН УССР еще в 1973 г., задолго до экспериментального обнаружения в 1979 г. первой гравитационной линзы. Основным результатом многолетних исследований явилась первая в мире монография [2], вышедшая из печати в 1989 г. и посвященная эффекту гравитационной фокусировки. В своей книге авторы привели интересные исторические факты и подвели итоги исследований гравитационных линз на конец 80-х годов XX столетия. Из механики Ньютона следовало, что свет – корпускула, как и все материальные тела, должен испытывать влияние поля тяготения, т.е. притягиваться к массивному объекту, например, Солнцу. Расчеты, проведенные немецким астрономом Зольднером в 1801 г. [3], показали, что луч света при своем прохождении вблизи края диска Солнца должен отклониться на угол $\theta \approx 0,87''$. В 1915 г. Эйнштейн, в рамках создаваемой им общей теории относительности, уточнил этот результат. Он показал, что результат

должен быть в два раза больше, т.е. $\theta \approx 1,75''$ [4]. Лодж в 1919 г. [5] обратил внимание на то, что лучи, огибающие Солнце со всех сторон, могут создать линзовый эффект. Хотя Лодж и возражал против термина «линза» из-за ее «ненормальных» свойств, тем не менее, он первый употребил это название применительно к фокусировке излучения полем тяготения.

До конца 80-х годов XX столетия теория ГЛ в основном была построена, хотя некоторые вопросы требовали еще своего решения. Многолетние исследования показывали, что имеется немалая вероятность обнаружения линзового эффекта на полях тяготения массивных галактик. И действительно, в 1979 г., как раз вовремя, и была обнаружена первая ГЛ – двойной квазар $Q\ 0957+561\ A, B$ [1]. Именно в этот период в строй вступили крупные оптические и радиотелескопы с высоким угловым разрешением. Можно сказать, что открытие первой гравитационной линзы не было случайным событием, а явилось результатом предсказания многолетних теоретических исследований и стремительного развития наблюдательной техники. Открытие первой ГЛ стимулировало целенаправленный поиск и наблюдения других линзированных объектов, и все большее число обсерваторий подключалось к этим исследованиям.

Тогдашний начальник Майданак С. Б. Новиков, обратив внимание на результаты наших наблюдений с ЭОП активных ядер галактик, предложил попробовать применить эту же методику к наблюдениям ГЛК. В апреле 1989 г. на 1-метровом телескопе Цейсс-1000 (гора Майданак) были проведены наблюдения ГЛК $MG1131+0456$. Этот объект был открыт в 1988 г. в радиодиапазоне как кольцеобразная структура с угловым диаметром порядка $2''$ и получил название «Кольцо Эйнштейна». К моменту наших наблюдений объект в оптическом диапазоне не был отождествлен. Несмотря на небольшой телескоп и достаточно архаичную светоприемную аппаратуру и вычислительную технику (мини-ЭВМ «Наири К»), нам удалось обнаружить объект примерно $22''$ в фильтре R. Изофоты изображения отличались от изображений точечных источников, указывая на протяженную структуру объекта, несколько вытянутую в направлении северо-восток – юго-запад. Структура содержала две конденсации яркости, что можно было интерпретировать как наличие двух компонентов в изображении $MG1131+0456$ (Вакулик и др., 1990). Следует отметить, что наблюдения $MG1131+0456$ в ближней инфракрасной области на 10-метровом телескопе в 1993 году [6] обнаружили два компонента с угловым разделением порядка $2''$, подтвердив тем самым наши предварительные оценки. Наш результат, опубликованный в небольшом сообщении в АЦ, по-видимому, является первым результативным наблюдением ГЛК, проведенным в СССР.

Помимо наблюдений $MG1131+0456$, на 1-метровом телескопе Цейсса на горе Майданак в 1989 – 1992 г.г. наблюдались и другие ГЛК – $Q2237+0305$, $Q0957+561$, $PG1115+080$, $H1413+117$. Наблюдения проводились с использованием ЭОП УМ-92, позволяющего регистрировать на фотопленке изображение ГЛК с экспозициями 40 – 60 секунд. Как правило, для каждого объекта регистрировалось 40 – 60 таких изображений. Применение достаточно коротких экспозиций несколько снижало требования к точности системы гидирования телескопа. В дальнейшем изображения вводились в компьютер с помощью специально разработанного для этих целей скоростного микрофотометра, (Вакулик и др., 1994), и с применением численных методов синтезировались усредненные высокоинформативные изображения, которые позволяли проводить улучшение качества зарегистрированных изображений – их восстановление. Такая методика позволяла реализовать достаточно высокую квантовую эффективность ЭОП порядка нескольких процентов, что заметно выше квантовой эффективности лучших астрономических фотоэмульсий. Наши наблюдения ГЛК главным образом были ориентированы на исследование тонкой структуры их изображений и на обнаружение линзирующих галактик. Однако когда к решению этих задач был подключен Космический телескоп Хаббла с угловым разрешением $0,04''$, наземным наблюдениям стало трудно выдерживать с ним конкуренцию.

В то же время, уже первые регулярные наблюдения $Q2237+0305$ и $Q0957+561$ показали, что эти столь удаленные объекты достаточно «живые» и динамичные – наблюдаются изменения блеска их компонентов на интервалах в несколько лет или даже месяцев [7]. Причиной этих вариаций являются события микролинзирования, проявляющиеся в локальных усилениях блеска отдельных компонентов ГЛК объектами линзирующей галактики – звездами и/или планетами. Из-за наличия относительного движения системы «квазар – линзирующая галактика (линза) – наблюдатель» видимые положения расщепленных макро-

линзой – галактикой изображений в разные моменты времени различным образом проектируются на плоскость галактики, как бы сканируют ее изображение. При этом, если в какой-то момент вблизи луча зрения в направлении на один из компонентов окажется объект галактики (звезда или иная компактная масса), его изображение дополнительно линзируется этим объектом. Возникающие при этом расщепления компонентов порядка нескольких угловых микросекунд не могут наблюдаться современными средствами. Однако изменения блеска, сопутствующие этому явлению, оказываются достаточно заметными и могут быть зарегистрированы при фотометрии такого объекта. Частота таких событий определяется относительной поперечной скоростью системы «квазар – линза – наблюдатель» и поверхностной плотностью объектов, а количественно наблюдаемые изменения блеска определяются массами линзирующих объектов и существенным образом зависят от углового размера линзируемого источника. Наблюдения событий микролинзирования предоставляют уникальную возможность измерения характерного размера квазара и изучения характеристик объектов линзирующей галактики с угловым разрешением, недоступным никаким другим методам.

Особо стоит отметить еще один важнейший астрофизический аспект применения эффекта гравитационного линзирования – измерения постоянной Хаббла. Если собственный блеск линзируемого объекта (квазара) изменяется во времени, эти изменения будут наблюдаться в каждом из его линзированных компонентов. Так как лучи света, формирующие изображения компонентов, распространяются по разным оптическим путям, вариации блеска источника будут наблюдаться в его линзированных изображениях не одновременно, а с некоторым запаздыванием (или опережением) относительно друг друга. Имея достаточно точные кривые блеска компонентов, можно получить оценки времени запаздывания. Если при этом измерены красные смещения объекта и гравитационной линзы и известно распределение массы в линзе (построена модель линзы), можно получить теоретические оценки ожидаемых времен запаздывания. Сравнение ожидаемых и измеренных времен запаздывания позволяет оценить постоянную Хаббла.

Решение этих задач требует получения продолжительных регулярных рядов оценок блеска компонентов – проведения программ мониторинга ГЛК, требующих значительных затрат наблюдательного времени. Из-за высокой стоимости наблюдательного времени Космического телескопа и наиболее крупных наземных телескопов проведение таких программ может быть осуществлено только на наземных телескопах умеренного размера, установленных в местах с наилучшим астроклиматом. С этой точки зрения обсерватория на горе Майданак представляется идеальным астропунктом для проведения регулярных фотометрических наблюдений с высоким угловым разрешением, необходимых для мониторинга ГЛК.

Становится очевидным, что регулярный фотометрический мониторинг ГЛК является актуальной задачей наземных наблюдений. Однако, как правило, эти объекты достаточно компактны ($1''$ – $2''$), изображения их компонентов даже при наилучших атмосферных условиях в значительной степени перекрываются друг с другом, поэтому оценки их блеска не могут быть получены простой апертурной фотометрией. Чтобы разделить (оценить) относительный вклад каждого компонента, необходимо знать характер распределения освещенности в изображениях точечных объектов – функцию рассеяния точки, т.е. фактически разделить систему на компоненты. Зачастую дополнительную проблему при фотометрии представляет линзирующая галактика, изображение которой накладывается на изображения линзированных компонентов квазара. Таким образом, фотометрическая задача ГЛК, по сути, становится адекватной задаче восстановления их изображений.

Однако применению ЭОП для фотометрических исследований препятствовали высокий уровень его собственных шумов и значительная и непостоянная во времени неоднородность чувствительности по фотокатоду. Чрезвычайно малое поле зрения ЭОП практически исключало возможность одновременной регистрации в кадре изображений звезд, которые могли быть использованы как вторичные стандарты. С конца 70-х годов на Западе в практику астрономических наблюдений начали внедряться светоприемники нового типа – приборы с зарядовой связью (ПЗС). Благодаря высокой квантовой эффективности и фотометрической стабильности ПЗС, их применение заметно повысило точность и эффективность астрономических наблюдений. Уже первые программы мониторинга ГЛК проводились с использованием ПЗС-приемников, что позволяло получить фотометрическую точность в несколько процентов для компонентов ГЛК 18^m – 19^m . Рассчитывать на приобре-

тение столь дорогостоящего приемника в середине 90-х годов в условиях жесточайшего экономического кризиса в Украине не приходилось, и дальнейшие перспективы этой работы представлялись достаточно неопределенными.

Однако проблема гравитационного линзирования уже прочно вошла в круг научных интересов сотрудников отдела. Ко всему прочему оказалось, что все знающие и все могущие объяснить теоретики находятся совсем рядом – в Радиоастрономическом институте НАНУ. Как уже отмечено ранее, в РИ НАНУ, в отделе, возглавляемом П. В. Блюхом, теоретические исследования проблем гравитационного линзирования проводились с 1973 года. Тесные научные и личные контакты сотрудников отдела методов обработки изображений с теоретиками из РИ НАНУ установились с 1988 г. Эти контакты не только позволили более определенно очертить круг наиболее интересных проблем, связанных с исследованиями гравитационного линзирования, но и стимулировали новые попытки наблюдений ГЛК.

Не теряя надежды на возможность дальнейшего проведения наблюдений ГЛК в условиях астроклимата горы Майданак, сотрудники НИИ астрономии А. П. Железняк, В. В. Коничек, И. Е. Синельников под руководством В. Н. Дудинова всячески пытались поддерживать техническое состояние телескопа АЗТ-22, оказывая узбекским коллегам помощь в его обслуживании и юстировке. В одной из таких поездок в сентябре 1995 г. В. Н. Дудинов встретился в обсерватории Майданак с Петером Нотни, сотрудником Потсдамского астрофизического института, который проводил наблюдения галактик с ПЗС Pictor-416. По предложению В. Н. Дудинова на этой ПЗС-камере было получено несколько изображений Q2237+0305.

Этот удивительно красивый объект – четыре попарно-симметричных звездообразных изображения вокруг ядра достаточно яркой и протяженной галактики (рис. 2.11.8), уверенно разделился на компоненты при высоком атмосферном качестве г. Майданак и вызвал искренний восторг и интерес у Петера. В течение трех последующих ночей, даже с некоторым ущербом для наблюдательной программы П. Нотни, были получены серии VRI-изображений Q2237+0305.

Предварительная обработка полученных изображений была выполнена в Потсдаме Петером Нотни, и для дальнейшей фотометрии отдельные фрагменты изображений были переданы в Харьков по электронной почте. В Харькове, в отделе методов обработки изображений, был разработан специальный алгоритм и программа для фотометрии этого сложного объекта. Однако полученные результаты VRI-фотометрии оказались весьма неожиданными – показатели цвета (V-R), (R-I) и (V-I) компонента В (как ожидалось, более «красного») оказались меньше показателей цвета компонента А. Как впоследствии стало понятно, был обнаружен новый важный результат, поэтому остановимся на вопросе о цвете компонентов Q2237+0305 более подробно.

Уже первые результаты фотометрии компонентов Q2237+0305, полученные в 1988 г. Йи [8] в фильтрах gri фотометрической системы Ганна, обнаружили заметное различие показателей цвета его компонентов. Так как показатели цвета компонентов систематически увеличивались по мере приближения их положений к центру линзирующей галактики, Йи предположил, что их наблюдаемые различия – результат селективного ослабления света компонентов веществом линзирующей галактики. На двухцветной диаграмме (g-i)-(g-r) значения показателей цвета компонентов расположились практически на прямой линии, что также подтверждало предположение Йи. Мало того, наклон линии покраснения на этой диаграмме оказался близким к наклону на аналогичной диаграмме, построенной по звездам нашей Галактики, что указывало на близость закона поглощения света в нашей Галактике и в галактике Q2237+0305, по крайней мере, в визуальной области спектра.

Эффект гравитационного линзирования не должен приводить к появлению каких-либо цветовых эффектов – фотоны разной энергии отклоняются гравитационным полем на один и тот же угол. Однако, еще в 1986 г. Кайзер с коллегами [9] обратили внимание, что, если линзируемый источник имеет температурный (а, следовательно, и цветовой) градиент вдоль радиуса, эффективный размер такого источника будет разным в разных длинах волн. Так как количественно увеличение блеска при микролинзировании источника зависит от его эффективного размера, при наблюдении в разных фильтрах возможно появление вариаций показателей цвета. Впервые этот эффект был проанализирован в численных модельных экспериментах в работе И. Вамбсансса и Б. Пачински [10].

Незначительные вариации показателя цвета (B-r) компонентов Q2237+0305 были обнаружены в рамках первого мониторинга этого объекта в 1986 – 1989 г.г. [7]. Однако количественно эти изменения цвета незначительно превышали ошибки измерений, и

авторам не удалось выявить систематический характер этих изменений.

К моменту наших первых наблюдений Q2237+0305 объяснение полученных Ии систематических различий цветов компонентов селективным поглощением веществом линзирующей галактики представлялось неизбежным. Согласно результатам фотометрии Ии, показатели цвета компонента А, наиболее удаленного от ядра галактики, оказались наименьшими, $(g-i) = -0,08^m$ относительно компонента В. Согласно нашим измерениям, более «красным» оказался компонент А – его показатель цвета $(V-I)$ оказался равным $+0,12^m$ по отношению к показателю компонента В.

Хотя сами значения обнаруженных изменений относительных показателей цвета компонентов А и В заметно превосходили ошибки их измерений, убежденность в ахроматичности эффектов микролинзирования была настолько велика, что мы долго не могли поверить полученному результату и тщетно пытались обнаружить ошибки в программе фотометрии или самой идеологии используемого алгоритма. Нотни даже высказал предположение, не перепутал ли В. Г. Вакулик, непосредственно занимающийся фотометрией Q2237+0305, его компоненты А и В местами. Впрочем, посмотрев на левое верхнее изображение Q2237+0305 на рис. 2.11.8, легко понять, что такое предположение не лишено оснований: система на момент наблюдений выглядит очень симметричной, а в нашем распоряжении были только небольшие фрагменты ПЗС-изображений, содержащие сам объект и звезду для оценки ФРТ.

Тщательные и многократные проверки подтвердили – ошибки нет, мы наблюдаем вариации показателей цвета компонентов. Статья с результатами фотометрии была направлена в печать, получила положительную рецензию И. Вамбсгансса и была опубликована в 1997 г. (Vakulik et al., 1997). В дальнейшем, результаты VRI-фотометрии изображений Q2237+0305, полученных на 2,4-метровом телескопе на острове Ла Пальма на месяц позже наших наблюдений [11], полностью подтвердили инверсию показателей цвета компонентов А и В.

Таким образом, с первой попытки был получен важный и интересный результат – в ГЛК, помимо вариаций блеска компонентов, наблюдаются заметные вариации их показателей цвета. Теперь предстояло выяснить, что является причиной этих вариаций, и проследить их возможную связь с событиями микролинзирования компонентов. Для исследования микролинзирования дальнейшие наблюдения Q2237+0305, кроме мониторинга в фильтре R, проводились также в фильтрах VRI.

Во многом благодаря успешным наблюдениям Q2237+0305 в 1995 г. и полученным интересным результатам было прорублено окно в Европу – наши сотрудники в 1997 г. были приглашены для участия в симпозиуме по гравитационному линзированию, проводимому Институтом астрофизики в Осло. В работе симпозиума приняли участие А. П. Железняк и сотрудник РИ НАНУ В. Н. Шаляпин. Были сделаны доклады об обсерватории Майданак и о работах, проводимых в отделе методов обработки изображений НИИ астрономии, а также о теоретических исследованиях эффектов ГЛ, проводимых в РИ НАНУ под руководством П. В. Блюха и А. А. Минакова. Были установлены контакты с мэтром европейского гравлинзирования Сьюром Рефсдалом и другими известными специалистами – Р. Стабелем, Д. Сюрдежем, И. Вамбсганссом. В Осло состоялось также знакомство с известным американским астрофизиком-наблюдателем, сотрудником Гарвард-Смитсоновского Астрофизического центра (США) Рудольфом Шилдом. С этого момента доброжелательный, энергичный, постоянно заряженный новыми идеями Руди становится на многие последующие годы нашим постоянным соавтором и надежным партнером. О его заметной роли в становлении наших исследований ГЛК мы скажем еще не раз.

В 1997 г. В. Н. Дудинову и А. А. Минакову, благодаря активной поддержке директора Института радиоастрономии НАНУ Литвиненко Л. Н., удалось инициировать долгосрочную научно-техническую программу «Развитие наблюдательной базы оптической астрономии на горе Майданак», которая была утверждена на уровне Министерства по делам науки и технологии Украины. В рамках этого проекта, помимо модернизации телескопа АЗТ-22, предполагались наблюдения и исследования ГЛК. Таким образом, программа по наблюдению ГЛК впервые получила финансовую поддержку, позволяющую проводить хотя бы эпизодические наблюдения этих объектов на телескопе АЗТ-22 на горе Майданак.

В рамках этой программы 30% наблюдательного времени телескопа АЗТ-22 предоставлялось для мониторинга ГЛК, но, чтобы обеспечить эффективную загрузку телескопа и организовать регулярные наблюдения, было необходимо дополнительное финансирование. Актуальной также оставалась проблема приобретения для телескопа АЗТ-22 совре-

менной ПЗС-камеры. Поэтому, в 1996 г. совместно с Институтом радиоастрономии НАНУ была подана заявка в международный фонд исследований и развития (CRDF). В рамках предложенного проекта были заявлены регулярные высокоточные наблюдения нескольких ГЛК с целью обнаружения и последующего анализа событий микролинзирования их компонентов. Руководителем проекта с украинской стороны согласился быть профессор РИ НАНУ Павел Викторович Блюх, один из авторов первой отечественной монографии «Гравитационные линзы» [2]. С американской стороны быть руководителем проекта любезно согласился профессор Принстонского университета (США) Богдан Пачински, известный специалист в области гравитационного линзирования, который к этому времени уже был лично знаком с В. П. Блюхом и А. А. Минаковым. Благодаря высокому научному авторитету руководителей проекта и приложенным к заявке прекрасным изображениям Q2237+0305, полученным на горе Майданак, он был одобрен и получил финансовую поддержку, которая позволяла обеспечить регулярные наблюдения ГЛК на протяжении двух лет.

В состав участников проекта вошли сотрудники отдела методов обработки изображений НИИ астрономии (руководитель В. Н. Дудинов) и сотрудники отдела космической радиофизики РИ НАНУ, руководимого А. А. Минаковым. Руководитель проекта, Павел Викторович Блюх, несмотря на плохое в то время состояние здоровья, оставался генератором идей и душой команды. Таким образом, сложился научный коллектив, способный проводить комплексные исследования ГЛК, начиная с наблюдений и фотометрии этих объектов, до интерпретации результатов наблюдений и теоретических исследований.

Неожиданно временно решилась проблема светоприемника для телескопа АЗТ-22. В 1996 году для мониторинга квазаров профессором Д. Тарншеком (США) на Майданакскую обсерваторию была поставлена ПЗС-камера TI-800 – охлаждаемая азотом профессиональная камера 800 x 800 элементов с размером пикселя 15 микрон. По договоренности с Д. Тарншеком эта камера могла быть также использована для наблюдений ГЛК, и с июля 1997 г. на АЗТ-22 были начаты их регулярные наблюдения.

К сожалению, на тот момент ПЗС-камера TI-800 была уже достаточно устаревшим прибором, со всеми недостатками, свойственными первым разработкам приборов этого типа. Наиболее существенным из таких недостатков является неэффективность переноса заряда – «растекание» вдоль столбца заряда, накопленного в светочувствительной ячейке, при его многократном переносе в процессе считывания. Вследствие этого, изображения компактных объектов, зарегистрированных на таких ПЗС, имеют вытянутую вдоль столбцов форму. Это не исключает возможность проведения точной апертурной фотометрии звездобразных объектов. Однако при фотометрии таких компактных объектов, как ГЛК, возникли серьезные проблемы, и при использовании этой камеры точность измерений оказалась недостаточно высока. Тем не менее, по кривым блеска Q2237+0305, полученным летом-осенью 1997 г., удалось обнаружить и впервые отметить (Блюх и др., 1999, Дудинов и др., 2000) некоторое увеличение блеска компонента С. Как оказалось впоследствии, это незначительное увеличение блеска было началом беспрецедентного события микролинзирования этого компонента, в результате которого его блеск в июле 1999 г. увеличился практически на 1^m .

В 1998 г. в Осло проходил очередной симпозиум по гравитационному линзированию, в работе которого приняли участие В. Н. Дудинов и А. П. Железняк. Были доложены первые результаты мониторинга ГЛК на горе Майданак. Для развития и финансовой поддержки наблюдений, по инициативе норвежского и датского коллег профессоров Р. Стабеля и Й. Хьорса, был учрежден международный общественный Фонд «Майданак», основными спонсорами которого выступили молодой норвежский астрофизик Хенрик Нильсен и американский энтузиаст и любитель астрономии Джеймс Буш. За счет средств Фонда Р. Шилдом в США была приобретена одна из лучших в то время полупрофессиональных ПЗС-камер ST-7, и уже с июля 1999 г. мониторинг ГЛК на горе Майданак проводился на этой камере. В Осло состоялось также совещание по совместному исследованию ГЛК, и было заключено Соглашение о дальнейшем сотрудничестве, а также было принято решение об оснащении телескопа АЗТ-22 специально разработанной профессиональной ПЗС для дальнейших совместных наблюдений ГЛК на горе Майданак. Разработка такой камеры была поручена специалистам из Копенгагенской астрономической обсерватории, и осенью 2000 года на обсерваторию на горе Майданак была поставлена ПЗС BroCam – охлаждаемая азотом камера 2000x800 элементов с размером пикселя 15 микрон. С 2001 года наблюдения ГЛК были продолжены на этой ПЗС.

Таким образом, благодаря настойчивости и энтузиазму сотрудников отдела, эпизодические наблюдения ГЛК на обсерватории Майданак с 1998 г. приобрели статус международной программы мониторинга ГЛК (Dudinov et al., 2000). Кроме украинских участников – НИИ астрономии и Радиоастрономического института НАНУ, в наблюдениях приняли участие ГАИШ МГУ (Россия) и Институт астрономии им. Улугбека (Узбекистан). Наблюдения проводились в тесном сотрудничестве с Институтом теоретической астрофизики (Норвегия) и Гарвард-Смитсоновским астрофизическим центром (США) и при финансовой поддержке гранта CRDF (1997 – 1999 г.г., руководители П. В. Блюх и Б. Пачински), грантов УНТЦ N-43 (2001 – 2003 г.г., руководитель И. Б. Вавилова) и U-127к (2004 – 2006 г.г., руководитель А. А. Минаков).

С 1998 по 2006 г.г. в рамках этой совместной программы проводятся регулярные наблюдения более 20 ГЛК и получено в общей сложности более 20 тысяч их ПЗС-изображений. Изображения 20 ГЛК, наиболее активно наблюдаемых на горе Майданак, представлены на рис. 2.11.9. По результатам исследований этих ГЛК был получен и опубликован ряд интересных результатов, наиболее значимыми из которых нам представляются следующие.

Q2237+0305. Получены кривые блеска компонентов ГЛК Q2237+0305 в фильтре R, охватывающие период с 1997 по 2005 г.г. (рис. 2.11.10). Обнаружены события микролинзирования всех четырех компонентов (Блюх и др., 1999, Дудинов и др., 2000, Vakulik et al., 2003, Vakulik et al., 2004). На рис. 2.11.8 представлены изображения Q2237+0305, полученные в фильтре R в 1995-2001 годах на 1,5 метровом телескопе на горе Майданак – заметные вариации взаимного блеска всех компонентов можно видеть даже без фотометрии изображений.

По результатам анализа VRI-фотометрии Q2237+0305 была установлена тесная связь вариаций показателей цвета компонентов с событиями микролинзирования. В работах (Дудинов и др., 2000, Vakulik et al., 2003) отмечена качественная тенденция смещения показателей цвета компонентов в «синюю» сторону при увеличении их блеска. По мере накопления данных по вариациям показателей цвета был проведен количественный корреляционный анализ их связи с вариациями блеска. Полученный достаточно высокий коэффициент корреляции (0,8) полностью подтвердил выявленную ранее качественную тенденцию и предположение, что наиболее вероятной причиной наблюдаемых вариаций показателей цвета компонентов являются события их микролинзирования (Vakulik et al., 2004). Это важное заключение, так как прямым его следствием является возможность исследования пространственно-спектральной структуры квазара, которая, очевидно, имеет достаточно сложный характер.

Анализ кривых блеска компонентов Q2237+0305, полученных по результатам фотометрии 2003 г., выявил почти синхронное увеличение блеска всех четырех компонентов (Vakulik et al., 2006). Хорошо известно, что квазары не являются стационарными объектами, и их блеск может меняться до 0,1-1 звездной величины на временных интервалах в несколько лет или месяцев. Известны также работы, в которых сообщается о быстрых вариациях блеска на интервалах несколько часов, которые могут достигать нескольких процентов. Но в системе Q2237+0305, благодаря необычной близости к наблюдателю линзирующей галактики ($z = 0.04$), высока вероятность событий микролинзирования, и вызванные ими значительные вариации блеска (до 1 звездной величины) могут маскировать возможные слабые вариации блеска источника-квазара. Именно поэтому в этой хорошо изученной и регулярно наблюдаемой ГЛК до 2003 года не удавалось обнаружить вариации блеска самого источника-квазара. Только благодаря низкой активности микролинзирования всех компонентов в период с июня по октябрь 2003 г. удалось уверенно обнаружить увеличение блеска самого квазара.

Коэффициенты корреляции кривых блеска компонентов оказались достаточно высокими – от 0,96 (для A и C компонентов) до 0,87 (для C и D), что указывало на то, что синхронные вариации блеска значительно превосходили индивидуальные вариации блеска компонентов, вызванные их микролинзированием. Был разработан метод оценок времен запаздывания путем совместной аппроксимации кривых блеска всех компонентов предполагаемой кривой блеска квазара, но с некоторым временным сдвигом для каждого компонента. Впервые для системы Q2237+0305 получены экспериментальные оценки времен запаздывания, не превышающие трех суток с ошибкой порядка одних суток.

Точность полученных оценок пока не высока, и они не позволяют сделать определенный выбор между существующими моделями микролинзы, но уже сам факт выявления синхронных вариаций блеска компонентов системы Q2237+0305 представляется достаточно важным, потому что является наиболее убедительным подтверждением гравитационно-линзированного происхождения этой системы.

Q0957+561. Это один из первых отождествленных ГЛК, в котором наблюдается феномен гравитационного линзирования [1]. Компоненты системы А и В имеют примерно равный блеск в красных лучах 17^m . Красное смещение компонентов Z, измеренное по эмиссионным линиям спектров, составляет для А 1,4054 и 1,4047 для В, по линиям поглощения – 1,3905 и 1,3908 для А и В, соответственно.

Квазар-источник в системе Q0957+561 оказался переменным, как в оптическом, так и в радиодиапазоне. Регулярные наблюдения вариаций блеска компонентов Q0957+561 позволили оценить время запаздывания между А и В – 417 суток. Помимо этого, анализ данных фотометрического мониторинга выявил события микролинзирования и возможные быстрые вариации блеска малой амплитуды [12,13].

Точность опубликованных на момент начала наблюдений оценок времени запаздывания для Q0957+561 составляла порядка 1 суток. В случае Q0957+561, как было показано в [13], измерение времени запаздывания с точностью порядка нескольких часов принципиально возможно благодаря наличию быстрых колебаний блеска источника-квазара (порядка 1% в течение ночи).

Для получения непрерывной кривой блеска компонентов Q0957+561 по инициативе Р. Шилда и В. Колли (R. Schild, W. N. Colley, Гарвард-Смитсоновский Астрофизический центр, США) был образован Наблюдательный консорциум, в состав которого вошли заинтересованные наблюдатели из 10 обсерваторий северного полушария, находящихся на различных долготах почти по всему земному шару. Для более надежного перекрытия 10-суточного интервала непрерывных наблюдений были задействованы также несколько обсерваторий на близких долготах, но в заведомо разных климатических зонах; последнее позволяло снизить риск, связанный с погодными условиями. Наблюдения планировались в два 10-суточных этапа, разнесенные во времени на значение времени запаздывания вариаций блеска между компонентами А и В Q0957+561. Главная цель наблюдений – обнаружить на первом этапе мониторинга значимые вариации блеска компонента А (ведущего) и обнаружить те же детали в кривой блеска компонента В (ведомого) в течение второго этапа непрерывных наблюдений, примерно через время запаздывания, т.е. примерно через 417 суток.

В рамках этой программы наблюдения Q0957+561 были проведены 20-29 января 2000 года А. П. Железняком и И. Е. Синельниковым и 12-21 марта 2001 года А. П. Железняком на 1,5-метровом телескопе на горе Майданак.

Вклад Майданакской обсерватории в полученный по данной программе наблюдательный материал составил 27 часов наблюдений на первом этапе и 53 часа – на втором, в общей сложности более 400 изображений. Фотометрическая обработка всех изображений, полученных на 10 обсерваториях, была проведена в Гарвард-Смитсоновском Астрофизическом центре. Высокое качество изображений, полученных на Майданакской обсерватории, и достаточно регулярная выборка по ночам позволили использовать эти изображения как базовый ряд для привязки наблюдений других 9 обсерваторий.

В результате реализации этой программы получена оценка временной задержки вариаций блеска компонентов Q0957+561 417.105 суток с формальной ошибкой $\pm 0,047$ суток (Colley et al., 2002, 2003).

SBS 1520+530. Двойной квазар SBS 1520+530 был открыт в 1996 г.; состоит из двух компонентов, разделенных угловым расстоянием $1,57''$. Красные смещения компонентов, измеренные по сильным эмиссионным линиям, оказались практически одинаковыми – $Z = 1.855$, что при почти полной тождественности спектров является наиболее весомым аргументом в пользу гравитационно-линзовой природы этого объекта.

Регулярные наблюдения этого объекта проводятся на горе Майданак с 1998 г. (Железняк и др., 2003, Zheleznyak et al., 2003). По изображениям, полученным при наилучшем качестве атмосферы в 2001 – 2002 г.г., синтезированы высокоинформативные изображения SBS 1520+530 в R и I фильтрах (рис. 2.11.11 а,б). Последующая специальная обработка и анализ позволили обнаружить линзирующую галактику (рис. 2.11.11 б) и получить оценки ее блеска в фильтрах R и I, причем в фильтре R такая оценка получена впервые (Zheleznyak et al., 2003).

Построена модель макролинзы SBS 1520+530, получена оценка массы линзирующей галактики и ожидаемое время запаздывания вариаций блеска компонентов 100 суток. Измеренные блеск в фильтре R и показатель цвета (H-R), а также оценка массы, полученная из моделирования, указывают, что линзирующая галактика в SBS 1520+530 является

спиральной (Zheleznyak et al., 2003).

Проведен анализ вариаций блеска компонентов, полученных в фильтре R в 2001 – 2002 годах, согласно которому оценка времени запаздывания составляет 128 суток. За период наблюдений с 2001 по 2005 г.г. обнаружено как минимум два события микролинзирования компонентов SBS 1520+530 (Khamitov et al., 2006).

SBS 0909+532. Из анализа объединенных кривых блеска компонентов SBS 0909+532, полученных в VR-фильтрах на телескопах Калар Альто, Визе и Майданакской обсерваторий, получена оценка времени запаздывания вариаций блеска A, B компонентов 45_{-11}^{+1} суток. Ведущим является компонент B. С учетом полученного времени запаздывания уточнена также разность блеска компонентов $m_B - m_A = 0.^m575 \pm 0.^m014$ в фильтре R, которая хорошо согласуется с моделью макролинзы и оценками, полученными ранее в работе (Ullan et al., 2006).

Кроме наблюдений ГЛК, фотометрии их изображений и анализа кривых блеска, в течение многих лет продолжались и теоретические исследования. Особое внимание уделялось вопросам статистики эффекта микролинзирования (ЭМЛ). Интерес к этому явлению объясняется, прежде всего, тем, что с помощью ЭМЛ можно получать важную информацию о распределении масс в галактиках – линзах и изучать тонкую структуру излучающих областей квазаров. Основные результаты, полученные в этом направлении, представлены в работах Минакова и Вакулика (2000), Минакова и др. (2001).

В работе Минакова и Вакулика (2000) исследовалось влияние эффекта микролинзирования на характеристики изображений далеких источников, видимых вблизи критических кривых сложных гравитационных линз, которые представлялись в виде суммы компактных образований – микролинз (звезды, звездоподобные или планетоподобные тела) и диффузно распределенной материи (пылевые, газовые облака и т.д.). Признаком близости изображений к критическим кривым гравитационных линз является наблюдение сливающихся, крестообразных, кольцообразных или дугообразных изображений источников. Основной целью работы являлось исследование структуры критических кривых и каустик сложной ГЛ при нахождении микролинз (звезд) вблизи критической кривой макролинзы – галактики. Исследования проводились на примере модели, соответствующей ГЛК Q2237+0305.

Проведенный анализ и численное моделирование позволили сделать следующие выводы:

1) Отдельная микролинза – звезда деформирует критическую кривую и каустик регулярной ГЛ. Величины деформаций пропорциональны малому параметру Γ , равному отношению массы микролинзы к массе ядра галактики, и быстро убывают по мере удаления микролинзы от критической кривой макролинзы. Для фиксированного положения источника излучения деформация макрокаустики приводит к фактическому изменению расстояния от источника до каустики, что вызовет соответствующие изменения блеска макроизображений. Учитывая, что вблизи критической кривой макролинзы может одновременно находиться достаточно большое количество микролинз, их влияние приведет к размытию границ критической кривой и каустики макролинзы.

2) Структура и поведение критических кривых, возникающих вблизи микролинзы, зависит не только от расстояния до критической кривой регулярной ГЛ, но и от того, в каком секторе углов перемещается микролинза. Характерные размеры критических кривых и микрокаустик пропорциональны $\sqrt{\Gamma}$.

3) Наибольшие деформации критических кривых и каустик, пропорциональные $\Gamma^{1/3}$, наблюдаются при нахождении микролинз в непосредственной близости от критической кривой регулярной ГЛ. В этом случае кривые макро- и микро-линз сливаются воедино, образуя сложные непрерывные линии.

4) Отличие результатов работы от полученных ранее в рамках стандартного (линеаризованного) учета действия регулярной ГЛ тем больше, чем ближе к критической кривой расположены микролинзы.

При гравитационной фокусировке переменных во времени и протяженных в пространстве источников излучения, кроме пространственных перераспределений яркости в видимых изображениях, происходит также и сложная деформация кривых их блеска. Величина временных деформаций зависит не только от параметров ГЛ (распределение массы внутри линзы), но и от параметров источника излучения (линейный размер излучающей

области, ее положение относительно критической кривой линзы, а также длительность импульса). Оказалось, что величины деформаций кривых блеска различны для каждого из наблюдаемых изображений. Можно сказать, что ГЛ действует подобно многоканальному фильтру, пропуская без искажения медленные временные вариации яркости источника и сглаживая быстрые.

В качестве примера в работе Минакова и др. (2001) была рассмотрена модель, описывающая фокусирующие свойства ГЛК Q2237+0305 («Крест Эйнштейна»). Результаты исследования показали, что вид кривой блеска отдельного изображения зависит от величины параметра $R \sim (\nu_0 \tau_g)^{-2}$. Здесь $\tau_g = 2r_g / cT_s$ – безразмерный параметр, равный отношению удвоенного гравитационного радиуса линзы $2r_g$ к расстоянию cT_s , которое свет проходит за время длительности сигнала T_s , излученного источником; а ν_0 – угловой размер источника, выраженный в единицах углового радиуса кольца Эйнштейна-Хвольсона.

В случае, когда $R \gg 1$ ($\nu_0 \tau_g \ll 1$, «маленький» источник излучения, «слабая» линза или «длинный» импульс), форма кривой блеска изображения практически не отличается от формы невозмущенной кривой источника. При небольших значениях R , когда $R < 1$ ($\nu_0 \tau_g > 1$, «протяженный» источник излучения, «сильная» линза или «короткий» импульс), необходимо учитывать сглаживающее действие линзы. При этом, из-за существующих различий фактора R для различных изображений, величины деформаций будут различными для разных изображений.

Характерные времена изменений яркости источника T_s , при которых необходимо учитывать сглаживающее действие ГЛ, можно определить как $T_s < r_g \nu_0 / c$ ($\nu_0 \tau_g < 1$). Для регулярной модели ГЛ Q2237+0305 с массой ядра галактики $M \sim 10^{10} M_\odot$ ($r_g \sim 3 \cdot 10^{10} \text{ км}$) и характерным угловым размером источника (квазара) в оптике, равным $\nu_0 \sim 10^{-4}$, была получена оценка $T_s < 10$ сек. Из наблюдений же «креста Эйнштейна» в ИК диапазоне [14] величина ν_0 была оценена как $10^{-5} < \nu_0 < 10^{-1}$. Выбрав, например, $\nu_0 \sim 10^{-2}$, получим оценку $T_s < 10^3$ сек. Таким образом, полученные оценки показали, что собственные изменения блеска квазара в оптике с временами $T_s < 10$ сек будут сглаживаться, а при $T_s > 10$ сек будут наблюдаться в изображениях практически без изменений.

В настоящее время гравитационно-линзовая тематика прочно вошла в жизнь нашего отдела. В 2004 г. А. П. Железняк успешно защитил кандидатскую диссертацию, посвященную изучению феномена гравитационного линзирования. Практически подготовлены еще две диссертации. Закончил аспирантуру выпускник астрономического отделения университета Г. В. Смирнов.

Два минувших года были годами напряженной работы по выполнению украинско-узбекского проекта УНТЦ, в течение которого был получен огромный наблюдательный материал, который явился источником новой информации о населении других галактик, пространственной структуре квазаров, геометрии наблюдаемой части Вселенной. И это, конечно, главный продукт нашей деятельности.

Но так уж всегда был устроен наш отдел, что практически всегда все этапы работы у нас выполнялись силами наших сотрудников – от создания приборов до анализа полученных результатов. Так и сейчас, прекрасный Майданакский полутораметровый телескоп, оставшийся с развалом Союза без хозяина, пришлось «приводить в чувство» своими силами, в сотрудничестве с москвичами и узбеками. Однако львиная доля работы пришлась на долю наших сотрудников – В. В. Коничека, А. П. Железняка, И. Е. Синельникова, А. В. Сергеева, А. Е. Кочетова. Сейчас телескоп находится полностью в рабочем состоянии: были отъюстированы обе фокальные системы, f/8 и f/16, установлена новая научная ПЗС-камера, приведена в порядок система вращения купола башни, наконец, что самое главное, в 2006 году была создана и установлена система автоматического гидирования. Если раньше из-за несовершенства существующей «родной» системы слежения невозможно было наблюдать с экспозициями больше 3 минут, теперь, благодаря новой системе, длительность экспозиций стала практически неограниченной. Благодаря всем этим мерам телескоп АЗТ-22 стал первоклассным инструментом, способным обеспечивать качество

изображения, определяющееся только астроклиматическими условиями. Остановка за малым – найти соответствующее финансирование, но это уже совсем не научная проблема.

Итак, прошли годы, менялись методы и аппаратные средства, и хотя наши научные интересы от объектов Солнечной системы сместились к самым удаленным объектам Вселенной – квазарам, неизменным осталось одно – стремление получить информацию о пространственной структуре объекта с предельно высоким разрешением. И если читателю покажется, что сейчас наши интересы свелись к наблюдению и тривиальной фотометрии пусть и таких нетривиальных объектов, как ГЛК, это совсем не так. Анализируя полученные кривые блеска ГЛК, мы пытаемся расшифровать, «рассмотреть» тонкую структуру изображений квазаров с угловым разрешением порядка микросекунд, что недостижимо другими средствами. Как и много лет назад, мы по-прежнему пытаемся «увидеть» на небе то, чего еще никто не видел...

Литература

1. *Walsh D., Carswell R., Weymann R.* 0957+561 A,B: twin quasistellar objects or gravitational lens? // *Nature* –1979. – 279, p.381-390.
2. *Блюх П. В., Минаков А.А.* // Гравитационные линзы. – Киев: Наук. думка, 1989. – 240с.
3. *Zoldner J.* Über die ablenkung eines lichtstrahls von fainer geradlinigen bewerbung, durch die attraktion eines weltkorpers, an welchem er nahe vorbei gent // *Berlin. Astron. Jahrbuch fur* 1804. – Berlin, 1804.– S.161.
4. *Эйнштейн А.* Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности // *Собр. науч. трудов.* – М., 1965. – Т.1. – С.439-447.
5. *Lodge O.* Gravitation and light // *Nature.* –1919. –104, N 2614. – P.354.
6. *Larkin J. E., Matthews K., Lawrence C. R., Graham J. R., Harrison W., Jernigan G., Lin S., Nelson J., Neugebauer G., Smith G., Soifer B. T., Ziomkowski C.* Near-infrared images of MG 1131+0456 with the W. M. Keck telescope: Another dusty gravitational lens? // *Astrophys. J., Part 2 – Letters (ISSN 0004-637X),* vol. 420, no. 1, p. L9-L12.
7. *Corrigan R. T., Irwin M. J., Arnaud J., et al.* Initial lightcurve of Q2237 +0305 // *Astron. J.* – 1991. –102. – P.34-40.
8. *Yee H.K.C.* High-resolution imaging of the gravitational lens system candidate 2237+0305 // *Astron. J.* –1988. – 95. – P. 1331-1339.
9. *Kayser R., Refsdal S., Stabell R.* Astrophysical applications of gravitational micro-lensing // *Astronomy and Astrophysics,* 1986, 166, no. 1-2. – P. 36-52.
10. *Wambsganss J., Paczynski B.* Expected color variations in the gravitationally microlensed QSO 2237+0305 // *Astron.J.* –1991. – 102. – P. 864-868.
11. *Burud I., Stabell R., Magain P. et al.* Three photometric methods tested on ground-based data of Q2237+0305 // *Astron. and Astrophys.* –1998. –339. – P.701-708.
12. *Colley W. N., Schild R. E.* Precision Photometry for Q0957+561 Images A and B // *Astrophys. J.* – 1999. – 518, № 1. – P. 153–156.
13. *Colley W. N., Schild R. E.* Hourly Variability in Q0957+561 // *Astrophys. J.* – 2000. –540, № 1. – P. 104–112.
14. *Agol E., Jones B., Blaes O.* Keck mid-infrared imaging of the QSO 2237+0305 // *Astrophys. J.* – 2000. – 545, pp. 657-663.

2.12. ПРОБЛЕМА УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СКВОЗЬ АТМОСФЕРУ

к.ф.-м.н. Ю. В. Корниенко

Информативность астрономического наблюдения определяется, в основном, двумя факторами: количеством света, собираемого телескопом, и угловым разрешением, с которым удаётся получить изображение наблюдаемого объекта. Это побуждало астрономов строить телескопы всё большего размера. Однако при этом был достигнут предел, за которым разрешение было ограничено уже не дифракцией света на апертуре телескопа, а искажением фронта световой волны под влиянием неоднородностей показателя преломления в атмосфере. Поэтому на повестку дня стал трудный вопрос: возможно ли преодолеть это влияние атмосферы и всё-таки достичь дифракционного предела разрешения телескопа?

С тех пор в этой области было выполнено большое количество самых разнообразных исследований, которые принесли значительную пользу, но так и не привели к радикальному решению проблемы. Поэтому исследования в этой области продолжаются. В частности, они интенсивно ведутся в Институте астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина и в ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины в тесном сотрудничестве двух коллективов.

Данная статья рассчитана на специалистов в этой области, преимущественно начинающих, и преследует цель окинуть единым взглядом различные аспекты этой проблемы, делая упор на принципиальные стороны вопроса и тот математический подход, который должен быть положен в основу для наилучшего понимания сути дела. В ней излагаются представления, сложившиеся в наших коллективах на протяжении долгого времени. Было бы интересно при этом окинуть взглядом историю сотрудничества наших коллективов, но, чтобы не перегружать данный раздел, эти сведения вынесены в другую статью, помещённую в этой же книге [1].

Немного истории

В 1877 г. было великое противостояние Марса. На это время пришёлся всплеск интереса к Марсу и возможному существованию жизни на нём. Поэтому не только научная общественность, но и широкие круги общества проявляли большой интерес к этому событию. «Гвоздём сезона» были наблюдения Дж. В. Скиапарелли, который объявил об открытии каналов на Марсе. Возник вопрос о независимой проверке этого открытия. Наблюдения Е. Антониади в 1893 г. его не подтвердили.

Между тем, Антониади вёл свои наблюдения на телескопе, имевшем дифракционное разрешение лучше, чем телескоп Скиапарелли. Как могло быть, что Скиапарелли видел на Марсе больше подробностей, чем Антониади? На самом деле большим секретом это не было. Ещё Гершель заметил, что на качество изображения оказывает большое влияние земная атмосфера. Поэтому с увеличением диаметра телескопа его разрешающая способность возрастает лишь до определённого предела, зависящего от состояния атмосферы, и дальнейшее увеличение диаметра не только не способствует повышению разрешения, но даже может дать обратный эффект.

В конце 19 века в наблюдательную астрономию стала входить фотография. Появилась надежда решить спор о каналах на Марсе самым объективным, как тогда казалось, способом. В 1909 г. Г. А. Тихов получил первые фотографии Марса. Они были высокого качества, но не содержали не только каналов, но даже некоторых деталей, существование которых не вызывало сомнения. Разрешение на фотографических изображениях было явно хуже, чем при визуальных наблюдениях. Тихов тогда же дал этому явлению простое объяснение: за время экспозиции изображение дополнительно замывается атмосферой. Последующие исследования подтвердили это. В великое противостояние Марса 1956 г. в Харькове Марс наблюдали Н. П. Барабашов и И. К. Коваль. Барабашов вёл свои наблюдения визуально

и делал зарисовки, а Коваль фотографировал Марс на фотопластинки. Сопоставление результатов показало, что Барабашов видел на Марсе заметно больше, чем получалось на фотопластинке. В частности, он следил за развитием глобальной пыльной бури, одной из самых сильных за время исследования Марса.

С начала 20 века борьба против мешающего влияния атмосферы стала одной из главных задач наблюдательной астрономии. Первой мерой, пассивной, но весьма эффективной, был выбор для обсерваторий мест с хорошим астроклиматом. Долгое время считалось, что лучшей по астроклимату является обсерватория на Пик-дю-Миди (Франция). Однако позже удалось найти места с ещё лучшим астроклиматом. В частности, это гора Майданак на юге Узбекистана. Её уникальный астроклимат был исследован выпускником кафедры астрономии Харьковского университета В. С. Шевченко.

Долгое время главным способом преодоления мешающего влияния атмосферы были визуальные наблюдения. Поскольку наблюдатель видит в телескоп практически мгновенное изображение, не усреднённое по времени, как на долгоэкспозиционной фотографии, он может рассмотреть мелкие детали, не скрытые атмосферным замытием. К тому же, он может использовать те редкие моменты времени, когда влияние атмосферы становится меньше. Для этого надо использовать телескоп не слишком большого диаметра, поскольку усреднение по апертуре телескопа производит эффект, похожий на усреднение по времени.

Появление высокочувствительных фотоэмульсий, а позже – электроннооптических преобразователей позволило производить киносъёмку исследуемого объекта. Это открыло возможность исследовать серию изображений более обстоятельно в спокойной обстановке, выбирая лучшие изображения и, возможно, суммируя их.

Для решения одной частной задачи (измерения диаметров звёзд) был предложен и реализован интерферометрический метод. Идея его восходит ещё к Физо, который высказал её в 1852 г. Практически она была осуществлена Майкельсоном с помощью его звёздного интерферометра в 1920 г. Фактически это был измеритель функции когерентности, но измерение было неполным и было пригодно для разрешения только таких простых объектов, как диск звезды. Однако идея стала руководящей в этой области и послужила началом для ряда других идей.

Прогресс в вычислительной технике и аналоговых средствах обработки изображений в 1940 – 1950 г.г. создал основу для идеи восстановления изображений, замытых атмосферой. Для этого предлагалось описывать замытие изображения свёрткой «истинного» изображения с ядром, описывающим влияние атмосферы, а затем решать интегральное уравнение, получая «истинное» изображение. Реализация этой идеи оказалась не простой не только в практическом (объём вычислений и т.д.), но и в математическом отношении (некорректная постановка задачи). В конечном счёте оказалось, что, хотя эта процедура во многих случаях полезна и даже весьма желательна, она не ведёт к радикальному решению проблемы.

В конце 1960-х годов появилась идея спекл-интерферометрии, т.е. накопления по большой серии короткоэкспозиционных изображений пространственночастотного энергетического спектра объекта и определения по нему автосвёртки изображения объекта, по которой в простейших случаях можно найти даже изображение объекта с дифракционным разрешением телескопа. Практически её возможности не выходили за пределы реконструкции изображений дисков звёзд и кратных звёзд.

В связи с этим были предприняты исследования условий, при которых можно восстановить изображение объекта по его энергетическому спектру. Было показано, что в принципе такая возможность обеспечивается конечностью размеров объекта. Однако практический эффект от попыток воспользоваться этой возможностью оказался весьма небольшим.

Особый класс сложности составляют задачи, в которых сочетаются требования высокого разрешения и высокой точности измерения световых потоков. В этом случае к экспозиции предъявляются противоречивые требования. Она должна быть достаточно короткой, чтобы уменьшить атмосферное замытие, но достаточно продолжительной, чтобы накопить требуемое число фотонов. Такие требования возникают, например, при исследовании гравитационных миражей, наподобие Креста Эйнштейна, когда удалённый источник, обычно квазар, виден сквозь гравитационное поле галактики в нескольких разных направлениях. По-видимому, эти задачи требуют своей наблюдательной техники и своих методов обработки наблюдательных данных.

Постепенно начало созреть понимание того, что для решения проблемы видения

сквозь турбулентную атмосферу надо искать новые способы не только постдетекторной обработки изображений, но и их формирования. В 1940-е годы появилась новая ветвь астрономии – радиоастрономия. Способ извлечения информации об объекте из проходящей от него электромагнитной волны существенно зависит от используемого диапазона длин волн. В радиодиапазоне от метров до сантиметров, который первоначально использовался в радиоастрономии, этот способ существенно отличается от того, который используется в традиционной оптике. Поэтому между этими областями возможна продуктивная взаимная подпитка идеями. В конце 1950-х годов в радиоастрономии появилась идея метода замыкания фаз, позволяющего при избыточном измерении функции когерентности исключить из неё фазовое искажение, вносимое атмосферой. Это открывает возможность при соответствующем построении радиотелескопа получать изображения, не искажённые атмосферой.

Возник вопрос: как распространить эти идеи на оптический диапазон? Ответ на него был найден в 1970-х годах на основе использования телескопа с безызыточной апертурой. Несколько позже, в конце 1980-х годов, в развитие предыдущей появилась идея, как можно обобщить идею интерферометра Майкельсона-Физо так, чтобы можно было полностью измерять функцию когерентности во всей области, которая доступна обычному телескопу. Эта идея пока ещё не нашла себе места в наблюдательной астрономии; её время, по-видимому, ещё впереди.

В последние десятилетия успешно развивается адаптивная оптика, т.е. оптика с гибкими поверхностями, деформируемыми так, чтобы компенсировать фазовые искажения в атмосфере. Здесь достигнуты большие успехи, однако, в основном, в инфракрасном диапазоне, где величина фазовых искажений меньше, чем в видимой области. Для управления формой поверхности требуется система управления, деформирующая поверхность в соответствии с поступающей извне информацией о характере фазовых искажений. На сегодняшний день это делается так, как позволяют сегодняшние технические возможности. Однако рано или поздно возникнет вопрос об оптимальном управлении формой поверхности и оптимальном способе обработки получаемых данных.

Этот вопрос окажется непростым, так как даже для наблюдений с помощью обычной оптики он, как правило, остаётся пока нерешённым. Типичным примером являются наблюдения с помощью обычного телескопа. В случае длительных экспозиций оптимальным при некоторых естественных предположениях оказывается винеровский фильтр. Но само наблюдение с длительной экспозицией обычно не является оптимальным. Если же разделить одну длительную экспозицию на большое количество коротких, изменится характер замыкающего ядра, а главное, оно будет труднее поддаваться измерению и во многих случаях останется неизвестным. Это в корне меняет задачу об оптимальной фильтрации полученных изображений; в таком виде она на сегодняшний день ещё не решена. Спекл-интерферометрию можно рассматривать как некую субоптимальную процедуру обработки такой последовательности, однако её неоптимальность налицо: она игнорирует содержащуюся в последовательности изображений информацию о фазах фурье-компонент на низких пространственных частотах.

Из всего сказанного видно, что перед нами стоят трудные задачи, к которым не всегда ясно, как подойти. Однако здесь речь пойдёт о результатах, которые уже получены, и о путях, по которым исследователи могут пойти в ближайшем будущем.

Проблема максимального извлечения информации об объекте из его астрономического изображения

Математическая формулировка задачи. В принципиальном отношении задача извлечения информации об астрономическом объекте из серии его изображений не отличается от других случаев исследования физического объекта по результатам выполненных над ним измерений. Наиболее естественным подходом к ней является байесовский статистический подход [2-4], основанный на оптимальной статистической оценке подлежащей определению величины по результатам эксперимента или наблюдения.

Пусть исследуемый объект характеризуется параметром X , значение которого неизвестно и подлежит выяснению с помощью проводимого эксперимента. Эксперимент состоит в измерении физической величины Y , значение которой находится в некоторой известной статистической связи с величиной X . Тогда по результатам измерения величины Y можно сделать заключение о значении величины X , имеющее, вообще говоря, вероятностный характер.

Пусть $R_{\text{до}}(X)$ – априорная плотность распределения вероятностей для величины X (до эксперимента), $R(Y)$ – плотность распределения вероятностей для измеряемой величины Y , $R(Y|X)$ – условная плотность вероятности получить при измерении результат Y , если значение параметра, характеризующего объект, есть X . Тогда апостериорная плотность вероятности $R_{\text{по}}(X|Y)$ (после эксперимента) для величины X при условии, что эксперимент дал результат Y , определяется формулой Байеса [2]

$$R_{\text{по}}(X|Y) = \frac{R_{\text{до}}(X) R(Y|X)}{R(Y)}. \quad (1)$$

Знаменатель в этой формуле в дальнейшем рассмотрении не участвует. Вторым сомножителем в числителе называется функцией правдоподобия. Её логарифм называют логарифмической функцией правдоподобия. Исходя из $R_{\text{по}}(X|Y)$, можно сделать статистическую оценку величины X . Под оптимальной оценкой понимается такая оценка, которая минимизирует апостериорное математическое ожидание функции потерь, задаваемой исследователем по соображениям, вытекающим из характера задачи. Результат оценки может быть разным в зависимости от того, как выбрать функцию потерь. В простейшем случае в качестве оценки X можно выбрать апостериорное математическое ожидание X (это соответствует квадратичной функции потерь) или наиболее вероятное значение X (это соответствует функции потерь, равной нулю в бесконечно малой окрестности X и постоянной за ее пределами). Функция потерь определяется конкретными целями исследования объекта и не может быть выведена из общих соображений.

Функция $R_{\text{по}}(X|Y)$ детально описывает наши знания о значении величины X . Однако во многих случаях для этой цели желательно иметь характеристику менее детальную, но более удобную в использовании. В частности, желательно, чтобы она обладала свойством аддитивности. Это позволило бы характеризовать эксперимент, состоящий из нескольких независимых измерений, суммой величин, характеризующих эффект от каждого измерения в отдельности.

Такой величиной является информация по Фишеру [2, 5]. Она определяется как апостериорная дисперсия информанта, т.е. градиента логарифмической функции правдоподобия.

В частности, для гауссова распределения логарифмическая функция правдоподобия равна $-\frac{1}{2}\alpha (X - X_0)^2$, где X_0 – наиболее вероятное значение X , а α – величина, обратная дисперсии X . Поэтому информация по Фишеру равна $\frac{1}{2}\alpha$. Поскольку в процессе экспериментального уточнения значения величины X её апостериорное распределение стремится обычно к гауссову в силу центральной предельной теоремы, этот частный случай является самым типичным.

Все сказанное здесь относится к одномерным величинам X и Y , но легко распространяется на многомерный случай. В этом случае X и Y считаются векторами M - и N -мерного числовых пространств, причем не обязательно $M = N$. Роль аддитивной характеристики измерения X теперь играет информационная матрица Фишера, определяемая как матрица автоковариации информанта [5].

Эти соображения, редко упоминаемые в физической и астрономической литературе, но хорошо известные в математической статистике [2], должны лежать в основе оптимизации эксперимента и обработки его результатов, когда речь идет о добыче научной информации, мало доступной в силу физических или экономических ограничений. Именно к этой категории относится информация об астрономических объектах, получаемая с помощью наземных телескопов или космических аппаратов.

Информативность астрономического наблюдения. Изображение астрономического объекта представляет собой функцию $I(x, y)$, описывающую зависимость яркости от точки на плоскости (более строго – на небесной сфере). В силу своей физической природы эта функция является ограниченной и интегрируемой. Её интеграл равен полной плотности потока энергии в точке наблюдения от объекта в целом. Поэтому существует преобразование

Фурье от этой функции. Каким бы ни был способ регистрации изображения, область пространственных частот, доступная для наблюдения, ограничена размерами входной апертуры изображающей системы, а возможно, и другими факторами, например, аберрациями оптики.

Ограниченность угловых размеров наблюдаемого объекта приводит к тому, что линейное функциональное пространство изображений S имеет дискретный базис. Ограничение пространственного спектра приводит к тому, что остается лишь конечное число независимых Фурье-компонент изображения, доступных наблюдению. Таким образом, изображение, будучи элементом функционального пространства, может тем не менее рассматриваться как математический объект, характеризуемый конечным, хотя и весьма большим набором параметров. Поэтому к изображениям можно применить все соображения, развитые в математической статистике для многомерных случайных величин.

Пусть в частотной плоскости задана периодическая решетка (прямоугольная или шестиугольная), узлы которой являются независимыми точками отсчета для фурье-образа изображения исследуемого объекта. Тогда в полосу пропускания изображающей системы попадает конечное число узлов этой решетки. Пронумеруем их от 0 до N . Обозначим через I_i коэффициент Фурье изображения, соответствующий i -й пространственной частоте. Тогда изображение можно рассматривать как N -мерный вектор I с компонентами $I_1, I_2, \dots, I_N$.

Этот вектор является случайной величиной в том смысле, что его значение нам точно не известно; вместо этого нам задано в пространстве изображений некоторое распределение вероятностей. Будем считать, что это распределение обладает плотностью, которая равна $R_{\text{до}}(I)$. Это априорная плотность распределения вероятностей. Она описывает наши знания об объекте, имеющиеся до проведения наблюдения объекта. Её значение в некоторой точке I пространства S описывает степень правдоподобия того, что исследуемый объект характеризуется изображением I .

До сих пор речь шла об изображении, построенном идеальной изображающей системой, действие которой на изображение состоит только в ограничении полосы передаваемых пространственных частот. При наблюдении мы имеем дело с другим изображением объекта, построенным реальной изображающей системой в реальных условиях. Это изображение J отличается от I наличием регулярных и случайных искажений, вносимых изображающей системой и средой распространения волн, а также шума регистрации. Таким образом, результат наблюдения оказывается случайной величиной даже при фиксированном значении I . Он характеризуется условной плотностью вероятности $R(J|I)$ того, что результат наблюдения равен J , если неискаженное изображение есть I .

Наблюдение объекта приводит к получению некоторого определенного значения J . Это позволяет с помощью формулы Байеса (1) найти новое распределение вероятностей для I , учитывающее результаты наблюдения. Оно характеризуется апостериорной плотностью вероятности $R_{\text{по}}(I|J)$ и описывает наши знания об объекте после проведения наблюдения. Исходя из этого распределения можно сделать статистическую оценку изображения I , истинный вид которого остается нам неизвестным ввиду отсутствия однозначной связи между истинным изображением объекта и результатом его наблюдения. В связи с этим возникает задача оптимальной статистической оценки I . Критерием оптимальности должен служить минимум апостериорного математического ожидания функции потерь. Как уже было сказано, в простейших случаях оптимальной оценкой является апостериорное математическое ожидание $E I$ или значение I_0 , при котором $R_{\text{ит}}(I|J)$ достигает наибольшего значения при данном J . В случае гауссова распределения обе эти оценки совпадают друг с другом.

Наблюдение доставляет нам новые сведения об объекте, увеличивающие наши знания о нём на величину, которая описывается информационной матрицей Фишера. Её элементы для достаточно гладкого апостериорного распределения вероятностей можно представить в виде

$$F_{ik} = E \frac{\partial^2 \ln R_{\text{по}}(I|J)}{\partial I_i \partial I_j} . \quad (2)$$

Здесь E означает апостериорное математическое ожидание. Эта матрица является аддитивной: если была проведена серия независимых наблюдений, характеризующихся

значениями $F^1, F^2, \dots, F^n$ матрицы F , то наши новые знания о значении величины I характеризуются матрицей

$$F^0 = F^1 + F^2 + \dots + F^n. \quad (3)$$

Для практических целей при работе с изображениями удобнее, исходя из информационной матрицы Фишера, построить другую аддитивную величину, скалярную и безразмерную, т.е. инвариантную относительно поворотов в пространстве S и изменения единиц, в которых измеряется величина I [6].

Требование безразмерности связано со следующими соображениями. Пусть значение некоторой скалярной физической величины X известно с некоторым разбросом, характеризуемым дисперсией d . Для гауссова распределения информация по Фишеру F о значении этой величины равна $F = 1/d$. (В остальных случаях фиксированного закона распределения она пропорциональна этой величине.) Если характеризовать этот объект вместо величины X величиной $X' = k X$, эта величина будет в нашем случае иметь значение $k X$ и дисперсию $k^2 d$, что приводит для информации по Фишеру к значению $1/k^2 d$. При этом понятно, что наши знания об объекте не изменились в результате изменения масштаба величины X . Чтобы мера количества информации не изменялась при изменении масштаба, ее нужно умножить на квадрат значения физической величины, т.е. принять за количество информации значение $X^2 F$.

Требование скалярности связано с тем, что наши знания об объекте не зависят от того, каким базисом в пространстве S мы пользуемся для их описания. Из матрицы F и вектора I можно построить два скаляра, линейных по F и квадратичных по I :

$$\Phi^1 = \sum_i \sum_k F_{ik} I_i I_k, \quad \Phi^2 = \sum_i \sum_k F_{ii} I_k I_k. \quad (4)$$

Из них предпочтение следует отдать первому выражению, поскольку составляющие его слагаемые имеют простой физический смысл. Действительно, пусть

$$B = \{B^{(l)}, l = 1, 2, \dots, N\} \quad (5)$$

– ортонормированный базис в пространстве S , в котором матрица F имеет диагональный вид. Ее диагональные элементы $f_1, f_2, \dots, f_N$ являются собственными значениями, а базисные векторы $B^1, B^2, \dots, B^N$ – соответствующими собственными векторами. В этом базисе выражение (4) для Φ^1 принимает простой вид

$$\Phi^1 = \sum_{l=1}^N f_l \cdot (I_l)^2. \quad (6)$$

Каждое слагаемое в (6) в свою очередь является скаляром, поскольку представляет собой произведение двух скаляров, в чем можно убедиться, если учесть, что второй сомножитель можно записать в виде квадрата скалярного произведения

$$(I_l)^2 = \left(\sum_i B_i^{(l)} I_i \right)^2. \quad (7)$$

В силу линейности Φ^1 по F аддитивность Φ^1 непосредственно следует из аддитивности F .

В свете сказанного выберем в качестве скалярной меры количества информации в изображении скаляр Φ^1 , обозначая его в дальнейшем просто Φ . Напомним, что эта величина связана с определением количества информации по Фишеру, а не по Шеннону. Вопрос о связи между этими двумя величинами, актуальный в случае, когда параметры исследуемого объекта изменяются в процессе наблюдения, выходит за рамки настоящей статьи.

Информативность компонент изображения и относительная ценность информации. Каждое слагаемое в (6) является скалярным и безразмерным, т.е. удовлетворяет требованиям, предъявляемым к Φ , и может служить мерой количества информации. Поскольку оно содержит зависимость только от одной компоненты вектора I , его следует рассматривать

как количество информации в компоненте I_l изображения. Таким образом, если изображение представлено в виде суммы собственных векторов информационной матрицы Фишера, количество информации в изображении равно сумме количеств информации в его компонентах. Это не относится к произвольному представлению вектора I в виде суммы векторов, поскольку в основе этого соотношения лежит статистическая независимость компонент, имеющая место не во всяком базисе.

Представление скалярной информативности изображения в виде суммы по всем его компонентам с практической точки зрения означает, что информативности всех компонент изображения приписывается одинаковая ценность. При решении конкретных задач дело может обстоять и не так. Чтобы корректно ввести количественную меру ценности различных частей информации, содержащейся в изображении объекта, рассмотрим в пространстве S базис B_0 , характеризующийся тем, что нас интересует точность знания компонент изображения в этом базисе и не интересуют корреляционные свойства погрешностей компонент изображения. При этом точности различных компонент мы придаем различную степень важности. Поэтому мы поставим в соответствие каждому базисному вектору b_l неотрицательный весовой множитель α_l и подчиним их условию

$$\sum_{l=1}^n \alpha_l = N. \quad (8)$$

Рассмотрим сначала частный случай, когда базис B_0 оказывается собственным базисом оператора $\hat{F}$ (представителем которого является матрица F). Определим теперь вместо (6) (взвешенное) количество информации в изображении как линейную комбинацию количеств информации в его компонентах с весовыми множителями α_l :

$$\Phi = \sum_{l=1}^N \alpha_l f_l I_l^2, \quad (9)$$

где f_l – собственные значения оператора $\hat{F}$. Введя вместо весовых коэффициентов α_l коэффициенты

$$c_l = (\alpha_l)^{1/2}, \quad (10)$$

выражение (9) можно переписать в виде

$$\Phi = \sum_{l=1}^N f_l (c_l I_l)^2. \quad (11)$$

Этот способ его записи подсказывает общее выражение для взвешенного количества информации Φ , форма которого не зависит от выбора базиса:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N F_{ik} C_{ij} I_j C_{km} I_m. \quad (12)$$

Здесь C_{ij} – компоненты самосопряженного оператора $\hat{C}$, описывающего относительную ценность информации о разных компонентах изображения. Его собственные значения равны c_l . Выражение (11) соответствует частному случаю, когда оператор $\hat{C}$ коммутирует с оператором $\hat{F}$.

Выражение (12) естественным образом переходит в (6), когда $\hat{C}$ является единичным оператором, т.е. когда информации обо всех компонентах изображения приписывается одинаковая ценность.

Обработка астрономических изображений как средство извлечения информации о физических характеристиках объекта. Зависимость яркости объекта от координат обычно не является конечной целью исследования объекта. Чаще она используется, чтобы сделать какие-то количественные выводы о физических характеристиках объекта. Это приводит к следующей формальной постановке задачи.

Пусть в каждой точке (x, y) плоскости изображения объект характеризуется набором параметров $p_1, p_2, \dots, p_m$, который обозначим через P . При данных условиях получения изображения яркость объекта является известной функцией этих параметров и, возможно, координат:

$$I(x, y) = \varphi(P(x, y), x, y). \quad (13)$$

Имеется серия из n таких изображений $I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_n(x, y)$, каждому из которых соответствует свой вид функции φ , а именно, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$. Требуется, исходя из этой серии, найти значения параметров P для каждой точки в плоскости изображения объекта.

Зависимость I от P может иметь не функциональный, а более общий характер: вид функции $I(x, y)$ может зависеть от вида функции $P(x, y)$ в целом. Иначе говоря, в соотношении (13) φ может быть не функцией, а оператором, отображающим область пространства функций $P(x, y)$ в пространство функций $I(x, y)$. Требуется найти $P(x, y)$, исходя из серии изображений $I^1, I^2, \dots, I^n$. Подход к этой задаче существенно определяется тем обстоятельством, что неискаженные изображения I никогда не бывают доступны исследователю. Вместо них он имеет дело с изображениями J , которые являются результатом искажения, в том числе случайного, изображений I . Это придает рассматриваемой задаче статистический характер: вместо обычной детерминированной обратной задачи отыскания P по $I^1, I^2, \dots, I^n$ теперь надлежит решать задачу оптимальной статистической оценки P по серии $J^1, J^2, \dots, J^n$. Решение этой задачи приводит к некоторому апостериорному распределению вероятностей в пространстве $\mathcal{P}$ функций $P(x, y)$. Если это распределение имеет достаточно гладкую плотность, существует информационный оператор Фишера, из которого можно построить выражение для количества информации, содержащейся в изображениях $J_1, J_2, \dots, J_n$ о виде функций $p_1(x, y), p_2(x, y), \dots, p_m(x, y)$, вполне аналогично тому, как это было сделано в предыдущих параграфах для изображения $I(x, y)$. Введенное таким способом количество информации можно использовать как меру информативности эксперимента по определению физической характеристики исследуемого объекта P . Такие задачи можно рассматривать как расширение класса задач фильтрации изображений в узком смысле, когда результатом фильтрации является новое изображение объекта.

Примером задачи такого рода может служить задача определения рельефа и оптических характеристик участка поверхности планеты по серии его изображений [7]. Эта задача имеет два аспекта: определение рельефа и определение оптических характеристик, которые могут интересовать исследователя и по отдельности. Однако рассматривать их приходится совместно, так как рельеф $H(x, y)$ и оптические параметры $p_1(x, y), p_2(x, y), \dots, p_m(x, y)$ одновременно влияют на функции яркости $I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_n(x, y)$. Ещё в [8] было показано, что простейший подход к этой задаче [9] приводит к некорректной её постановке, и для корректного её рассмотрения требуется сформулированный выше статистический подход. Однако и до сих пор появляются работы, в которых предпринимаются попытки обойти некорректность поставленной задачи с помощью тех или иных компромиссных приёмов, вместо того, чтобы корректно поставить и решить задачу на основе давно известного статистического подхода. Такая ситуация имеет место и со многими другими задачами экспериментальной физики и наблюдательной астрономии.

Направление исследований. Как видно из всего изложенного выше, задача максимального извлечения информации об объекте из серии его изображений ставит перед исследователем ряд требований.

Во-первых, нужно уметь решать прямую задачу рассеяния света объектом (или аналогичную задачу об излучении), что необходимо для выяснения вида функции или оператора φ , т.е. задачу определения $J_1(x, y), J_2(x, y), \dots, J_n(x, y)$ по известным функциям $p_1(x, y), p_2(x, y), \dots, p_m(x, y)$.

Во-вторых, требуется аккуратный подход к решению обратной задачи рассеяния, т.е. задачи статистической оценки параметров $p_1(x, y), p_2(x, y), \dots, p_m(x, y)$ по известным изображениям $J_1(x, y), J_2(x, y), \dots, J_n(x, y)$. В примитивной постановке, когда требуется найти P по заданному J , она часто оказывается некорректной, что заметно усложняет процедуру опти-

мальной статистической оценки.

В-третьих, возможность статистической оценки предполагает знание условной вероятности $R(Y|X)$ в (1), для чего необходимы специальные экспериментальные и теоретические исследования шумов, сопровождающих процесс регистрации изображения.

Наконец, требуется корректный учет априорной информации об объекте, которая может сузить класс возможных трактовок результатов наблюдения и существенно повлиять на апостериорное распределение вероятностей.

Из этого следует, что, помимо общей математической концепции обработки изображений, следует уделить внимание конкретным задачам, связанным со спецификой объектов исследования, целей их исследования и технических средств, применяемых для их исследования. В частности, внимания требуют следующие задачи:

- прямые задачи рассеяния света конкретными объектами, представляющими интерес для исследователя;

- обратные задачи рассеяния света, ориентированные на определение конкретных физических характеристик исследуемого объекта;

- исследование шумов, сопровождающих наблюдение и порождаемых аппаратурой и средой распространения;

- поиск методов обработки наблюдательного материала, максимально учитывающих специфику конкретных исследуемых объектов.

Круг задач этого типа обширен и требует привлечения сил многих исследователей. В Институте астрономии ХНУ и в ИРЭ НАНУ исследования в этой области относились преимущественно к таким задачам.

Из класса прямых задач рассеяния – исследование рассеяния света структурами, характерными для поверхности безатмосферных тел Солнечной системы.

Из класса обратных задач рассеяния – разработка метода восстановления рельефа поверхности планеты и её фотометрических характеристик по серии ее изображений.

Наконец, количество информации об объекте, содержащейся в изображении, находится в прямой зависимости от числа компонент, составляющих изображение, т.е. от пространственного разрешения, с которым удаётся получить изображение объекта, а также от точности их измерения.

Поэтому традиционная задача повышения разрешения при наблюдении объекта сквозь земную атмосферу по-прежнему сохраняет свою актуальность. Рассмотрим эту проблему более подробно.

Влияние атмосферы на астрономическое изображение

Электромагнитная волна как носитель информации об удаленном объекте. Вся информация об исследуемом объекте, которую мы получаем при астрономических наблюдениях, извлекается из поля приходящей от него электромагнитной волны. Поэтому всякий разговор об информативности астрономических наблюдений и путях ее повышения следует начинать с анализа физических механизмов, лежащих в основе астрономического наблюдения.

Пусть удаленный точечный объект, излучающий сферическую монохроматическую волну с частотой ω , расположен относительно наблюдателя в направлении единичного вектора $\mathbf{n}$. Эта волна, дойдя до наблюдателя, становится практически плоской, поскольку радиус кривизны ее фронта равен расстоянию до объекта. Поэтому ее электрическое поле удобно представить в виде:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^+ e^{i\phi} + \mathbf{E}^- e^{-i\phi}. \quad (14)$$

Здесь $\mathbf{E}$ – мгновенная напряженность электрического поля волны, зависящая от радиуса-вектора $\mathbf{r}$ точки в пространстве и момента времени t . Она представлена в комплексном виде, т.е.

$$\mathbf{E} = E_x + iE_y, \quad (15)$$

где E_x и E_y – компоненты вектора $\mathbf{E}$ вдоль осей x и y некоторой декартовой системы координат, определенной на плоскости, перпендикулярной направлению $\mathbf{n}$.

Поскольку электромагнитная волна имеет два независимых состояния поляризации,

формула (14) содержит два слагаемых, из которых первое представляет собой волну с левой круговой поляризацией, а второе – с правой. Эти слагаемые зависят от полной фазы волны Φ , которая равна

$$\Phi = \mathbf{k} \mathbf{r} - \omega t + \varphi, \quad (16)$$

где $\mathbf{k}$ – волновой вектор, имеющий направление, противоположное вектору $\mathbf{n}$, и модуль, равный

$$k = c/\omega = 2\pi/\lambda, \quad (17)$$

c – скорость света, λ – длина волны, φ – случайная начальная фаза. Множители E^+ и E^- представляют собой комплексные амплитуды составляющих электромагнитной волны с правой и левой круговой поляризацией.

При астрономических наблюдениях приходится иметь дело с некогерентным светом. Это значит, что различные точки объекта излучают волны со случайными начальными фазами, равномерно распределенными и не коррелированными между собой.

Величиной, доступной непосредственному измерению при астрономических наблюдениях в оптическом диапазоне, является интенсивность

$$I = \frac{c}{4\pi} \overline{E^* E}, \quad (18)$$

т.е. плотность потока энергии (звездочка означает комплексное сопряжение), усреднённая по ансамблю. Другие характеристики световой волны поддаются измерению лишь постольку, поскольку удаётся поставить эксперимент, в котором они влияют на распределение световых потоков в пространстве и времени. В предельном случае слабого светового потока всякое оптическое измерение сводится к выявлению факта наличия или отсутствия фотона в заданных местах пространства в заданные промежутки времени.

Поскольку напряженность поля E является случайной величиной, интенсивность тоже оказывается случайной величиной. Детерминированной характеристикой объекта является математическое ожидание интенсивности, т.е. ее среднее значение по статистическому ансамблю. Однако каждый астрономический объект уникален, и усреднение по ансамблю, будучи очень полезной математической абстракцией, практически не осуществимо. Здесь на помощь приходит свойство эргодичности рассматриваемой системы: интересующее нас среднее по ансамблю значение равно среднему значению по времени.

Простые оценки показывают, что время, достаточное для такого усреднения при астрономических наблюдениях в оптическом диапазоне, составляет величину порядка наносекунды и меньше, т.е. флуктуации интенсивности светового потока, обусловленные его некогерентностью при реальных временах экспозиции, не приводят к ощутимым погрешностям. Это не относится к квантовым флуктуациям, влияние которых может быть очень большим.

Некогерентное изображение объекта. Как известно, в случае монохроматического поля линза формирует в задней фокальной плоскости распределение поля, являющееся фурье-образом поля в передней фокальной плоскости

$$E(\rho) = \int \tilde{E}_0(\kappa) \tilde{a}(\kappa) e^{i\kappa \rho} dS_{\kappa}. \quad (19)$$

Здесь ρ – радиус-вектор точки в задней фокальной плоскости, κ – радиус-вектор точки в передней фокальной плоскости, $E(\rho)$ – поле в задней фокальной плоскости, $\tilde{E}(\kappa)$ – поле в передней фокальной плоскости, $\tilde{a}(\kappa)$ – апертурная функция, равная единице в пределах апертюры и нулю за её пределами, dS_{κ} – площадь элемента поверхности в окрестности точки передней фокальной плоскости κ .

Пропуская квазимонохроматическую световую волну от объекта через линзу, мы получим тот же результат, что и для когерентного излучения: поле в задней фокальной плоскости линзы $E(\rho)$ будет обратным преобразованием Фурье от поля в передней фокальной плоскости $E(\kappa)$. Некогерентность волны проявится, однако, в том, что амплитуда поля $E(\rho)$ будет быстро (с точки зрения экспериментатора) меняться со временем, а доступной измерению окажется только средняя по времени интенсивность

$$I(\rho) = \langle E^*(\rho) \cdot E(\rho) \rangle . \quad (20)$$

Подставляя сюда выражение для $E(\rho)$ через $\tilde{E}(\kappa)$ из (19) получим

$$I(\rho) = \langle \iint \tilde{E}^*(\kappa') \tilde{E}(\kappa'') e^{-i\kappa'\rho} e^{i\kappa''\rho} \tilde{a}(\kappa') \tilde{a}(\kappa'') dS_{\kappa'} dS_{\kappa''} \rangle . \quad (21)$$

С помощью замены переменных $\kappa = \kappa'' - \kappa'$, учитывая, что якобиан перехода от переменных κ', κ'' к переменным κ', κ равен единице, получим

$$I(\rho) = \iint \tilde{I}_0(\kappa) \tilde{A}_0(\kappa) e^{i\kappa \rho} dS_{\kappa} , \quad (22)$$

где

$$\tilde{I}_0(\kappa) = \langle \tilde{E}_0^*(\kappa') \tilde{E}_0(\kappa' - \kappa) \rangle \quad (23)$$

– взаимная интенсивность светового потока от объекта (в силу теоремы Ван-Циттерта-Цернике она не зависит от κ'), а

$$\tilde{A}_0(\kappa) = \int \tilde{a}(\kappa') \tilde{a}(\kappa' + \kappa) dS_{\kappa'} \quad (24)$$

– пространственно-частотная характеристика телескопа для некогерентного света.

Из (22) в силу теоремы о свертке следует, что реальное изображение $I(\rho)$ связано с идеальным изображением $I_0(\rho)$ (в отсутствие влияния диффракции) соотношением

$$I(\rho) = \int A_0(\rho - \rho') I_0(\rho') dS_{\rho'} , \quad (25)$$

где $A_0(\rho - \rho')$ – дифракционное ядро, т.е. изображение точечного источника в некогерентном свете. Его фурье-образ равен $\tilde{A}_0(\kappa)$. По теореме о свертке это ядро равно квадрату модуля ядра $a(\rho)$, как и должно быть из очевидных физических соображений (интенсивность пропорциональна квадрату модуля напряженности поля).

Поскольку поле в апертурной плоскости телескопа отличается от поля в передней фокальной плоскости только фазовым множителем, который изменяется с расстоянием для E и E^* в противоположные стороны, взаимная интенсивность поля $I_0(\kappa)$ в передней фокальной плоскости и в апертурной плоскости одна и та же. На этом основании мы в дальнейшем будем для удобства оперировать с полем и взаимной интенсивностью в апертурной плоскости, сохранив для радиуса-вектора в ней обозначение κ .

Влияние фазовых искажений при наблюдении с помощью телескопа малого диаметра. Пусть телескоп с диаметром D , малым по сравнению с характерным размером атмосферных неоднородностей, расположен непосредственно за искажающим слоем, а толщина слоя мала по сравнению с радиусом кривизны искаженного волнового фронта (роль этого требования прояснится ниже). Предположим, что мы наблюдаем с его помощью звезду (т.е. точечный объект), расположенную в направлении оси z . Фазу в некоторой точке x, y на апертуре телескопа можно приближенно представить с помощью ряда Тэйлора в виде

$$\varphi(x, y) \approx \varphi(0, 0) + \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=0, y=0} x + \left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{x=0, y=0} y + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right|_{x=0, y=0} x^2 + \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right|_{x=0, y=0} x y + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right|_{x=0, y=0} y^2 . \quad (26)$$

Нулевой член $\varphi(0, 0)$ в этой формуле определяет фазу на оси телескопа, слагаемые первого порядка описывают наклон фазового фронта, а второго – его кривизну. Поскольку $x < D/2$, $y < D/2$, для достаточно малых D можно пренебречь вторым и более высокими членами ряда. Тогда получается, что влияние фазовых искажений в этом приближении проявляется только в наклоне фазового фронта, т.е. эквивалентно изменению направления на звезду. Глядя в телескоп, мы увидим, что изображение звезды случайным образом смещено относительно ее истинного положения. Поскольку распределение показателя преломления в пространстве меняется со временем, мы увидим, что звезда беспорядочным образом перемещается относительно своего среднего положения, причем большие

отклонения менее вероятны. Этот эффект называется атмосферным дрожанием. Его типичная величина составляет одну угловую секунду. При ночных наблюдениях в пригодных для этого местах в плохую погоду она может возрасти на порядок, а в местах с рекордно высоким качеством изображения она иногда может уменьшаться до $0,1''$.

Влияние квадратичных членов ряда Тэйлора легко прояснить, если сначала предположить, что коэффициенты при x^2 и y^2 равны, а перекрестный член равен нулю. Тогда в окрестности точки экстремума фазы форма волнового фронта близка к сфере с радиусом, равным радиусу кривизны R . Таким образом, лучи, пересекающие волновой фронт вблизи этой точки, пересекаются между собой в центре кривизны волнового фронта впереди или позади него, в зависимости от знака коэффициентов. В этом случае среда играет роль линзы с фокусным расстоянием R . Это изменяет фокусное расстояние системы телескоп – атмосфера на относительную величину F/R (при $F \ll R$) и приводит к расфокусировке изображения, такой, что изображение точки (в отсутствие дифракции) становится кругом с радиусом DF/R . В случае неравенства коэффициентов при x^2 и y^2 или ненулевого перекрестного члена появляется астигматизм, приводящий к тому, что изображение точки становится эллипсом.

Высшие члены ряда Тэйлора порождают аберрации, подобные тем, которые возникают от несовершенства поверхностей объектива. Таким образом, даже при малом диаметре объектива влияние фазовых искажений на изображение носит сложный характер и не сводится только к случайному перемещению изображения как целого. Однако в этом случае большую роль играет дифракция, и атмосферные аберрации могут оказаться скрытыми под дифракционным пределом разрешения. Эта возможность реализуется, когда высшие члены в формуле (26) в пределах апертуры телескопа малы по сравнению с единицей.

Формирование изображения большим телескопом. Исследуя астрономический объект, астроном стремится использовать телескоп возможно большего диаметра, чтобы собрать больше света и уменьшить влияние дифракции на четкость изображения. Поэтому, рассматривая атмосферные неоднородности как мешающий фактор при астрономических наблюдениях, мы должны уделить главное внимание их влиянию на астрономическое изображение, формируемое телескопом большого диаметра. С этой целью рассмотрим систему, состоящую из телескопа и расположенного в непосредственной близости от него тонкого слоя среды со случайными неоднородностями показателя преломления.

Как мы видели в предыдущем пункте, в отсутствии искажающей среды электрическое поле приходящей световой волны в апертурной плоскости телескопа представляет собой фурье-образ поля на поверхности объекта, а влияние среды проявляется в добавлении к фазе волны случайной добавки δ . Поэтому искаженное электрическое поле волны $\tilde{E}(\mathbf{k})$ в апертурной плоскости связано с неискаженным полем $\tilde{E}_0(\mathbf{k})$ соотношением

$$E(\mathbf{k}) = E_0(\mathbf{k}) e^{i\delta(\mathbf{k})}. \quad (27)$$

Поле в фокальной плоскости телескопа $E(\rho)$ является фурье-образом поля в передней фокальной плоскости, поэтому, аналогично (19),

$$E(\rho) = \int \tilde{E}_0(\mathbf{k}) e^{i\delta(\mathbf{k})} \tilde{a}(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\rho} dS_{\mathbf{k}}. \quad (28)$$

Исходя из равенства (20), подставляя в него (28) и применяя ту же замену переменных, что и в (22), получим равенство, аналогичное (22), но учитывающее атмосферные искажения фазы

$$I(\rho) = \iint \tilde{I}_0(\mathbf{k}) \tilde{A}(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\rho} dS_{\mathbf{k}}, \quad (29)$$

где

$$\tilde{A}(\mathbf{k}) = \int \tilde{a}(\mathbf{k}') \tilde{a}(\mathbf{k}' + \mathbf{k}) e^{i[\delta(\mathbf{k}' + \mathbf{k}) - \delta(\mathbf{k}')] } dS_{\mathbf{k}'}, \quad (30)$$

– пространственно-частотная характеристика системы телескоп – атмосфера. Она является фурье-образом аппаратной функции системы телескоп – атмосфера $A(\rho)$, которую мы для краткости будем называть атмосферным ядром, хотя в ее формировании принимает участие не только атмосфера, но и телескоп. Изображение, сформированное телескопом при наличии

атмосферных искажений, является сверткой идеального изображения $I_0(\rho)$ с этим ядром

$$I(\rho) = \int A(\rho - \rho') I_0(\rho') dS_{\rho'} . \quad (31)$$

Анализ свойств атмосферного ядра. Чтобы составить представление о виде ядра $A(\rho)$, рассмотрим пару точек $\mathbf{k}'$, $\mathbf{k}''$ в пределах апертуры телескопа. Соединяющий их вектор $\mathbf{k} = \mathbf{k}'' - \mathbf{k}'$ является той пространственной частотой, которую передает пара элементов площади апертуры dS' , dS'' в окрестности этих точек. Как видно из (30), в передаче этой компоненты принимают участие все пары точек входной апертуры телескопа, для которых вектор, соединяющий их, равен $\mathbf{k}$. Мера множества этих пар точек равна площади области пересечения апертуры с ее образом, параллельно сдвинутым на вектор $\mathbf{k}$ (рис. 2.12.1).

Если бы атмосфера была однородной, т.е. отклонения показателя преломления были равны нулю, интеграл в (30) был бы равен этой площади $\tilde{A}_0(\mathbf{k})$. Однако при наличии атмосферы вклады этих пар точек складываются не синфазно, поскольку подвержены искажающему действию, выраженному экспоненциальным множителем в (30). Представив вклад пары элементов dS' , dS'' в рассматриваемую фурье-компоненту как вектор на комплексной плоскости $dI(\mathbf{k})$ (рис. 2.12.2), мы увидим, что под влиянием атмосферного искажения он поворачивается на угол, равный разности фазовых искажений в точках апертуры, передающих эту компоненту,

$$\Delta(\mathbf{k}', \mathbf{k}'') = \delta(\mathbf{k}'') - \delta(\mathbf{k}') . \quad (32)$$

Величина этой разности зависит от расстояния между элементами dS' , dS'' , т.е. от пространственной частоты $\mathbf{k}$. При $\mathbf{k} \rightarrow 0$ она стремится к нулю, при $|\mathbf{k}| < l$ она мала, при $|\mathbf{k}| = l$ она порядка единицы, при дальнейшем росте $|\mathbf{k}|$ она возрастает по закону, который зависит от типа случайного процесса $\delta(\mathbf{k})$. (Мы будем измерять размер неоднородностей l в тех же единицах $\lambda / 2\pi$, что пространственные частоты и расстояния в апертурной плоскости.)

Если этот процесс, как было предположено вначале, является стационарным гауссовым процессом, то дисперсия Δ_0^2 величины $\Delta(\mathbf{k}', \mathbf{k}'')$ приближается к удвоенной дисперсии величины $\Delta(\mathbf{k})$. Если это, как многие считают, процесс более общего класса – процесс с независимыми приращениями, – эта дисперсия возрастает неограниченно, по закону, зависящему от характера процесса. Для винеровского процесса она растет пропорционально $|\mathbf{k}|$, для колмогоровского процесса – пропорционально $|\mathbf{k}|^{5/3}$, и т.д. Однако вдаваться в эти подробности нет большой необходимости, так как эти различия проявляются, когда модуль вектора $\mathbf{k}$ стремится к бесконечности. Нас же интересует поведение функции $\Delta(\mathbf{k}', \mathbf{k}'')$ в пределах апертуры телескопа. На конечном интервале этот процесс всегда можно условно считать стационарным гауссовым процессом.

Поскольку функция $\delta(\mathbf{k})$ имеет радиус корреляции l , интеграл (30) можно представить в виде суммы интегралов по областям размером l . В каждой такой области $\delta(\mathbf{k})$ можно грубо считать постоянным, а значения интеграла по разным областям – независимыми друг от друга. В результате, интеграл окажется суммой независимых случайных величин, каждая из которых равна значению $\exp[i\Delta(\mathbf{k})]$ в некоторой точке области $\mathbf{k}$, умноженному на площадь области, равную по порядку l^2 . Число таких областей m при данном $\mathbf{k}$ приблизительно равно $\tilde{A}_0(\mathbf{k}) / l^2$.

При обычном состоянии атмосферы и больших $\mathbf{k}$ вектор, представляющий фурье-компоненту на рис. 2.12.2, может совершать несколько оборотов в обоих направлениях. Тогда все его направления становятся приблизительно равновероятными, и их суммирование по разным областям становится подобным случайному блужданию, в котором каждый шаг совершается в случайном направлении, независимом от предыдущих шагов. Такое блуждание, начавшись в начале координат, после m шагов заканчивается в случайной точке, типичное расстояние которой от начала координат равно $\sqrt{\tilde{A}_0(\mathbf{k})} \cdot l$, т.е. в $\sqrt{m}$ раз меньше, чем при суммировании одинаково направленных векторов. Этим выражением характеризуется завал высших пространственных частот в мгновенном

изображении под влиянием атмосферных фазовых искажений.

Влияние атмосферы на долгоэкспозиционное изображение. До сих пор мы рассматривали мгновенную картину формирования астрономического изображения, т.е. не учитывали изменения фазовых искажений со временем. В действительности же фазовые искажения из-за воздушных потоков в атмосфере изменяются со временем случайным образом. Это изменение имеет свое характерное время τ . Регистрация изображения тоже занимает определенное время T , называемое временем экспозиции. Если $T \ll \tau$, то изменением фазовых искажений со временем можно пренебречь и считать, что формирование изображения определяется мгновенной картиной фазовых искажений. В остальных случаях приходится учитывать, что изображение, накопленное за время экспозиции, является результатом усреднения мгновенного изображения по времени.

При астрономических наблюдениях во многих случаях, в особенности, когда светоприемником служит фотопластинка, время экспозиции приходится выбирать намного большим, чем τ . В этом случае происходит усреднение изображения по большому числу независимых мгновенных реализаций картины атмосферных искажений. Это усреднение, в силу (предполагаемой) эргодичности процессов в атмосфере, должно приводить к тому же результату, что и усреднение по статистическому ансамблю; отличия носят случайный характер и обусловлены лишь недостаточным временем усреднения. В силу линейности соотношения (31) математическое ожидание усредненного изображения равно свертке истинного изображения с ядром $G(\rho)$, равным математическому ожиданию атмосферного ядра $A(\rho)$. Поэтому представляет интерес выяснить свойства этого ядра.

Обращаясь к равенствам (30) и (31), мы видим, что фурье-образ этого ядра можно получить усреднением по ансамблю равенства (30). При этом под интегралом появляется математическое ожидание

$$g(\mathbf{k}) = \mathbf{E} e^{i[\delta(\mathbf{k}' + \mathbf{k}) - \delta(\mathbf{k}')]}, \quad (33)$$

которое в силу однородности процесса $\delta(\mathbf{k})$ не зависит от $\mathbf{k}'$ и потому может быть вынесено за интеграл. В результате, равенство (30) после усреднения по ансамблю приобретает вид

$$\tilde{A}(\mathbf{k}) = \tilde{A}_0(\mathbf{k}) \tilde{g}(\mathbf{k}), \quad (34)$$

а множитель $\tilde{g}(\mathbf{k})$ легко вычислить, учитывая нормальный закон распределения случайной величины $\Delta(\mathbf{k}', \mathbf{k}'')$ и представляя $g(\mathbf{k})$ в виде

$$\tilde{g}(\mathbf{k}) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\zeta} e^{-\frac{\zeta^2}{2\Delta_0^2(\mathbf{k})}} d\zeta, \quad (35)$$

где второй множитель под интегралом представляет собой плотность распределения случайной величины $\Delta(\mathbf{k})$ (в роли которой под интегралом выступает переменная интегрирования ζ). Вычисляя этот интеграл, получим

$$\tilde{g}(\mathbf{k}) = e^{-\frac{1}{2}\Delta_0^2(\mathbf{k})}. \quad (36)$$

Если предположить дифференцируемость процесса $\delta(\mathbf{k})$ и представить $\delta(\mathbf{k}'')$ рядом Тейлора, ограничиваясь линейным членом

$$\delta(\mathbf{k}'') = \delta(\mathbf{k}') + \nabla \delta(\mathbf{k}')(\mathbf{k}'' - \mathbf{k}'), \quad (37)$$

получим

$$\Delta_0^2(\mathbf{k}) = \gamma^2 \mathbf{k}^2, \quad (38)$$

где γ пропорционально среднеквадратичному значению модуля градиента фазового искажения δ . Поэтому для небольших значений $\mathbf{k}$, при которых кривизна фазового фронта незначительна и потому справедливо приближение (37), $g(\mathbf{k})$ можно представить в виде

$$\tilde{g}(\mathbf{k}) \approx e^{-\frac{1}{2}\gamma^2 \mathbf{k}^2}. \quad (39)$$

Вычисляя от этого выражения обратное преобразование Фурье, окончательно получим

$$g(\rho) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\gamma} e^{-\frac{1}{2}\frac{\rho^2}{\gamma^2}}. \quad (40)$$

С учетом этого из (34) обратным преобразованием Фурье получим

$$A(\mathbf{k}) = \int A_0(\mathbf{k} - \mathbf{k}') g(\mathbf{k}') dS_{\mathbf{k}'}, \quad (41)$$

то есть атмосферное ядро, усредненное по длительному времени, является сверткой аппаратной функции телескопа в отсутствие атмосферы $A_0(\rho)$ и долгоэкспозиционного атмосферного ядра $g(\rho)$, которое теперь характеризует только атмосферу и не зависит от телескопа. Для больших телескопов ядра $A(\rho)$ и $g(\rho)$ мало отличаются друг от друга.

Пути преодоления мешающего влияния атмосферы

Идея восстановления долгоэкспозиционных изображений. Эта идея в 1960-е годы стала привлекать внимание многих исследователей. Одним из первых её высказал И. К. Коваль в 1965 году [10].

Физическая картина деградации астрономических изображений под влиянием земной атмосферы, рассмотренная в предыдущем параграфе, подсказывает идею восстановления этих изображений, т.е. такой послерегистрационной обработки их, которая окажет на них обратное воздействие и сможет в той или иной степени скомпенсировать искажающее действие атмосферы.

Ниже подробно рассмотрена эта идея в ее простейшем виде, возражения, которые она может вызвать, а также выводы, которые следует сделать из этих возражений.

Как следует из результатов предыдущего пункта, связь между истинным изображением $I_0(x, y)$ и результатом воздействия на него атмосферных искажений $I(x, y)$ можно записать в виде

$$I(\rho) = \int h(\rho - \rho') I_0(\rho') dS_{\rho'}, \quad (42)$$

где $h(\rho - \rho')$ – искажающее ядро, равное $A(\rho - \rho')$ в случае короткой экспозиции и $g(\rho - \rho')$ в случае длительной экспозиции. Это равенство можно рассматривать как интегральное уравнение Фредгольма первого рода с разностным ядром, в котором неизвестной функцией является истинное изображение объекта. Можно надеяться, решив это уравнение, найти $I_0(\xi, \eta)$, т.е. получить изображение объекта, свободное от атмосферных искажений.

Выполняя преобразование Фурье от обеих частей равенства (42), в силу теоремы о свертке мы получим

$$\tilde{h}(\mathbf{k}) \cdot \tilde{I}_0(\mathbf{k}) = \tilde{I}(\mathbf{k}), \quad (43)$$

где буквы с волной означают Фурье-образы соответствующих функций координат. Это уравнение для $\tilde{I}_0(\mathbf{k})$ является алгебраическим и легко решается:

$$\tilde{I}_0(\mathbf{k}) = \tilde{I}(\mathbf{k}) / \tilde{h}(\mathbf{k}). \quad (44)$$

Выполняя над полученной функцией $\tilde{I}_0(\mathbf{k})$ обратное преобразование Фурье, получим искомое изображение $I_0(\rho)$:

$$I_0(\rho) = \int \frac{\tilde{I}(\mathbf{k})}{\tilde{h}(\mathbf{k})} e^{i\mathbf{k}\rho} dS_{\mathbf{k}}. \quad (45)$$

Таким образом, процедура решения уравнения (42) оказывается весьма простой. В этой схеме, однако, есть момент, требующий более тщательного рассмотрения.

Ядро $g(\rho_0 - \rho'_0)$ является сглаживающим, его фурье-образ быстро убывает, стремясь к нулю, с ростом пространственной частоты. Поэтому в отсутствие шума так же себя ведёт и фурье-образ замытого изображения, и подынтегральная функция в (45) как фурье-образ истинного изображения стремится к нулю. Однако в присутствии шума числитель в (45) содержит в качестве слагаемого реализацию случайного шума, спектр которого может вести себя совсем иначе. Тогда подынтегральная функция в (45) обычно вовсе не стремится к нулю, а иногда неограниченно возрастает, интеграл в (45) расходится, и решение уравнения (42) не существует.

На помощь приходит статистический подход. Задача восстановления изображения ставится как задача оптимальной статистической оценки истинного изображения при заданном зарегистрированном изображении. В случае стационарного гауссова шума и квадратичной функции потерь эта задача приводит к хорошо известному оптимальному винеровскому фильтру.

Восстановление долгоэкспозиционных изображений заслуживает внимательного отношения и широкого внедрения в практику наземных астрономических наблюдений. В частности, оно необходимо при фотометрической стандартизации изображений, полученных в неодинаковых условиях [11,12]. Однако существенного повышения разрешения оно дать не может из-за быстрого убывания фурье-образа ядра с ростом пространственной частоты. Практически оно позволяет повысить разрешение только в 2-3 раза, в то время как влияние атмосферы снижает разрешение большого телескопа в десятки раз.

Накопление сигнала при астрономическом наблюдении. Получение изображения с длительной экспозицией являет собой пример накопления сигнала. В простейшем случае его суть можно пояснить на примере измерения скалярной величины, скажем, светового потока от звезды. Пусть производится его измерение с помощью электрофотометра и при этом фототок усредняется по времени t . В результате такого наблюдения для светового потока получается значение

$$\Gamma_1 = \Gamma_0 + \delta_1, \quad (46)$$

где Γ_0 – истинное значение измеряемой величины, а δ_1 – случайная нормально распределённая погрешность с нулевым средним значением и дисперсией D . Если такая точность нас не устраивает, мы можем повторить это измерение, скажем, n раз. В результате, будет получен набор значений $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$, каждый со своей погрешностью. Чтобы обоснованно ответить на вопрос, какова же величина измеряемого светового потока, нужно найти оптимальную статистическую оценку величины Γ_0 . При квадратичной функции потерь строгое решение задачи приводит к хорошо всем известному результату

$$\Gamma_{no} = (\Gamma_1 + \Gamma_2 + \dots + \Gamma_n) / n. \quad (47)$$

При этом Γ_{no} будет отличаться от Γ_0 на величину погрешности с нулевым средним, дисперсия d которой будет теперь равна

$$d = D/n. \quad (48)$$

В этом состоит смысл многократного измерения.

Суммирование результатов отдельных измерений может быть выполнено на этапе обработки наблюдений. Но его можно выполнить и непосредственно в процессе наблюдения, например, увеличив время интегрирования фототока до величины nt . Этот приём называется накоплением сигнала. Накопление, выполняемое в соответствии с процедурой оптимальной статистической оценки, будем называть оптимальным накоплением.

Аналогичным образом получение серии долгоэкспозиционных изображений объекта и последующее их суммирование можно заменить получением одного изображения с соответственно увеличенной экспозицией. Оно позволяет повысить точность фотометрии.

Однако в случае короткоэкспозиционных изображений дело обстоит несколько сложнее. Атмосферные неоднородности случайным образом возмущают фурье-компоненты изображения, причём преимущественно их фазы. Если искажение становится порядка 2π или больше, усреднение приводит к подавлению этих фурье-компонент. Это происходит преимущественно на высоких пространственных частотах. Возмущение фурье-компоненты изображения атмосферными неоднородностями можно рассматривать как шум, однако

теперь уже не аддитивный, а мультипликативный. Это приводит к тому, что в отсутствие шума регистрации оптимальной процедурой накопления теперь становится не арифметическое, а геометрическое усреднение фурье-компонент по серии изображений, т.е. арифметическое усреднение их логарифмов (арифметическое усреднение фаз фурье-компонент было предложено в [13]).

Спекл-интерферометрия и реконструкция изображения по его энергетическому спектру. Убедившись в том, что съёмка объекта с длительной экспозицией не является оптимальным способом накопления сигнала, следует переходить к поиску других способов накопления.

В 1970 году Лабейри предложил свой метод преодоления мешающего влияния атмосферы [14]. Он состоял в получении большой серии короткоэкспозиционных изображений и последующем усреднении не самих изображений, а их энергетического спектра. Это делалось с помощью когерентнооптического фурье-преобразователя. Новый способ накопления сигнала лучше соответствовал характеру атмосферного шума. Его результатом была не вся информация об изображении, а только квадрат модуля его фурье-образа. Этот результат не позволяет непосредственно получить изображение объекта, однако позволяет путём преобразования Фурье найти с дифракционным разрешением телескопа автосвёртку изображения объекта

$$C(\mathbf{r}) = \int I(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) I(\mathbf{r}') dS', \quad (49)$$

где $I(\mathbf{r})$ – яркость объекта в точке с радиус-вектором $\mathbf{r}$, dS' – элемент площади в окрестности точки $\mathbf{r}'$. Автосвёртку сложного объекта интерпретировать довольно трудно. Однако для простых объектов, таких как диск звезды или двойная звезда, связь между изображением и его автосвёрткой достаточно прозрачна: глядя на автосвёртку, нетрудно представить себе вид объекта.

Всё же было бы желательно, исходя из полученного таким путём энергетического спектра, реконструировать изображение, если это вообще возможно. В общем случае эта задача не может быть решена однозначно. Однако можно поставить вопрос иначе: при каких условиях она могла бы быть решена? В работе [15] сформулировано достаточное для этого условие: объект должен содержать в себе достаточно интенсивный точечный источник.

На самом деле задачу можно решить и при более слабых условиях. Достаточным условием оказывается просто конечность угловых размеров объекта [16]. Этот результат было легко получить, исходя из такой аналогии. В электродинамике имеют место соотношения Крамерса-Кронига [17], связывающие вещественную и мнимую часть диэлектрической проницаемости вещества. Эта связь вытекает из одного единственного положения – принципа причинности, в силу которого отклик вещества на внешнее воздействие не может иметь место раньше начала самого воздействия. Это значит, что (разностное) ядро оператора проводимости, переводящего напряжённость поля в наведенный ток, при отрицательных значениях аргумента (запаздывания) всегда равно нулю. Из этого простого математического факта и вытекают соотношения Крамерса-Кронига, позволяющие найти фазу комплексной диэлектрической проницаемости как функцию частоты по её модулю.

В нашем случае яркость объекта отлична от нуля только в конечной области на плоскости, т.е. удовлетворяет более жёсткому ограничению. Это должно привести к не менее жёсткой связи между модулями и фазами фурье-компонент изображения объекта конечных размеров. Эти соображения были подтверждены в работе [18]. Там же был предложен алгоритм реконструкции изображения, близкий к описанному в [16].

Алгоритм, предложенный в [16], представляет собой итерационный цикл, в котором на первом шаге производится коррекция спектра текущего (приближённого) изображения, а на втором шаге яркость за пределами выделенной для изображения области принудительно обращается в нуль. При коррекции спектра фаза каждой фурье-компоненты оставляется неизменной, а модулю придаётся значение, заданное условием задачи. Одновременно могут выполняться и другие виды коррекции, например, обращение в нуль яркости там, где она получилась отрицательной.

Как и ожидалось [16], этот алгоритм оказался весьма эффективным, когда изображение в нулевом приближении мало отличается от истинного. Однако при случайном выборе нулевого приближения обнаружилось, что во многих случаях процесс замедляется, приближаясь к результату, отличному от правильного. В некоторых из таких случаев

удалось выяснить, что процесс через большое число шагов снова набирает скорость и приводит в конце концов к правильному результату. В большинстве же случаев такого финала дожидаться не удаётся, даже при современной вычислительной технике, и можно предположить, что предел, к которому сходится процесс, не является единственным. Результаты успешного восстановления изображения тест-объекта по его энергетическому спектру были представлены в [19]. Эти исследования были выполнены в ИРЭ АН УССР Д. Г. Станкевичем в 1980 году и продолжены С. И. Скуратовским в 2007 году. В последнее время они касались зависимости получаемого результата от начального приближения и были направлены на изучение поведения функции $F(I)$, определённой в пространстве изображений S и принимающей вещественные значения; её значение для изображения I определяется как евклидово расстояние от истинного изображения того предела, к которому сходится итерационный процесс, если в качестве начального приближения было взято изображение I . Полученные результаты подтвердили прежнее представление о том, что в пространстве S существуют области, из которых процесс сходится к неправильному результату (попадает в ловушку). Множество таких ловушек оказывается дискретным; пространство S поэтому распадается на области, в пределах каждой из которых функция F оказывается константой; эти области образуют сложную фракталоподобную структуру.

Телескоп как измеритель функции когерентности и пространственное накопление сигнала. Если характер производимого измерения позволяет многократно повторить его во времени, мы получаем возможность временного накопления сигнала. Точно так же, если возможно одновременное измерение интересующей нас величины из разных точек пространства, можно осуществить пространственное накопление сигнала. Тривиальным примером этого является измерение одной и той же величины на разных обсерваториях (например, служба времени). Однако нас будет интересовать менее очевидный пример: пространственное накопление сигнала при наблюдении объекта с помощью обычного телескопа.

Как видно из формул (29) и (30), изображение в фокальной плоскости телескопа является фурье-образом функции когерентности поля (умноженной на фурье-образ ядра, апертурного в отсутствие атмосферы и атмосферно-апертурного в реальном случае). Поэтому наблюдение с помощью телескопа можно рассматривать как измерение функции когерентности поля волны, приходящей от объекта. Такой взгляд может оказаться продуктивным, если учесть, что функцию когерентности в принципе можно измерять и каким-то другим способом.

Рассматривая (30) с этой точки зрения, можно заметить, что $I(\rho)$ является результатом интегрирования многих независимых измерений взаимной интенсивности, выполненных при различных значениях κ' . Поскольку поле от наблюдаемого объекта пространственно коррелировано, это интегрирование приближенно эквивалентно суммированию по дискретному набору точек, отстоящих друг от друга на радиус корреляции поля. Это интегрирование вполне аналогично интегрированию сигнала по времени в радиотехнике, и потому его можно рассматривать как накопление сигнала, однако не временное, как в случае радиосигналов, а пространственное. При таком подходе сразу возникает вопрос о том, является ли это накопление оптимальным. В качестве критерия оптимальности выберем условие минимума среднеквадратичной ошибки. Будем считать оптимальным такое накопление сигнала, которое позволяет получить наиболее вероятное значение измеряемой величины с минимальной среднеквадратичной ошибкой.

Представим себе, что измерения функции взаимной интенсивности для разных κ' производятся независимо: погрешности разных измерений распределены нормально и независимо и имеют одну и ту же дисперсию. Из очевидных статистических соображений ясно, что в этом случае оптимальным способом накопления сигнала является арифметическое усреднение результатов измерения. Положение, однако, меняется, когда в игру вступают атмосферные искажения фазы. В этом случае, как видно из (30), шум становится мультипликативным, нормально распределенная погрешность оказывается в показателе экспоненты, сигналом, оптимальным накоплением которого является арифметическое суммирование, становится логарифм измеряемой величины, и, следовательно, оптимальным накоплением сигнала (в отсутствие шума регистрации) становится геометрическое усреднение фурье-компонент изображения.

Если атмосферные возмущения фазы малы по сравнению с единицей, экспоненту в (30) можно разложить в ряд Тэйлора, ограничиваясь линейным членом. В этом случае геометрическое усреднение приближенно эквивалентно арифметическому. Итак, мы видим,

что телескоп в присутствии атмосферы является оптимальным накопителем сигнала лишь в той степени, в какой справедливо такое приближение. Это означает, что в случае реальной атмосферы, когда фазовые набегі составляют 2π и более, традиционный способ формирования изображения с помощью телескопа оказывается весьма далеким от оптимального.

Оптимальное пространственное накопление сигнала в присутствии фазовых искажений. Чтобы упростить дальнейшее рассмотрение, будем считать, что исследуемый объект имеет малые угловые размеры, в результате чего в силу теоремы Найквиста–Котельникова его фурье-образ однозначно определяется своими значениями в точках отсчёта, регулярно расположенных в частотной плоскости с достаточно малым шагом.

Пусть апертура телескопа разделена на n субапертур такого размера, что зависимостью атмосферного искажения фазы в пределах субапертуры можно пренебречь. Тогда связь между измеренной и истинной фазами той фурье-компоненты функции когерентности, которая передается парой субапертур с номерами i и j , имеет вид

$$\varphi_v + \delta_j - \delta_i = \psi_\mu, \quad (50)$$

где φ_v – фаза v -ой фурье-компоненты, δ_i и δ_j – фазовые искажения на i -ой и j -ой субапертурах, ψ_μ – результат μ -го измерения функции когерентности, выполняемого с помощью i -ой и j -ой субапертур.

Совокупность всех уравнений этого вида с $i, k = 1, 2, \dots, n$ образует линейную систему, определяющую истинные значения фаз фурье-компонент изображения, подлежащего реконструкции по результатам наблюдения. Найти решение этой системы означало бы полностью исключить влияние атмосферы на изображение объекта. Насколько велика надежда на успех в этом деле, целиком зависит от свойств этой системы.

Первый вопрос, который возникает, касается единственности решения системы (50): достаточно ли уравнений для этого она содержит? Следующий простой расчет хотя и не доказывает единственности решения, дает большие основания для надежды. Пусть апертура содержит n субапертур. Тогда существует $n(n-1)/2$ различных пар субапертур, позволяющих выполнить столько же независимых измерений функции когерентности. Это выражение растет асимптотически квадратично с ростом числа субапертур. С другой стороны, если некоторая область апертурной плоскости плотно заполнена субапертурами, то число различных частотных окон, передаваемых такой апертурой, растет пропорционально n . Таким образом, число уравнений в системе (50) растет с ростом n квадратично, в то время как число неизвестных, включая неизвестные фазовые искажения δ_i , только линейно. Это приведёт к тому, что при достаточном n число уравнений как угодно превзойдёт число неизвестных.

Вопрос о существовании таких расположений субапертур, при которых система (50) имеет единственное решение, решается простой проверкой. Уже для небольших n , начиная с пяти, удастся найти подходящие конфигурации субапертур; некоторые из них приведены на рис. 2.12.3.

Второй вопрос касается существования решения при наличии погрешности измерения фаз функции когерентности. Они неизбежно присутствуют и, как нетрудно показать, приводят к тому, что переопределенная система (50) с вероятностью 1 становится несовместной. Это не зачеркивает идею, а лишь приводит к необходимости, как и во многих других подобных случаях, более ответственно ставить математическую задачу с позиций статистического подхода. Если все измерения правых частей системы (50) производятся в равных условиях и потому сопровождаются независимыми погрешностями с одной и той же дисперсией, вопрос решается традиционным методом наименьших квадратов, который дает нам наиболее вероятные значения неизвестных.

Поэтому процедура решения системы (50) методом наименьших квадратов и есть оптимальный способ пространственного накопления сигнала при измерении функции когерентности. Заметим при этом, что такое накопление вряд ли когда-либо удастся осуществить в процессе измерения, и его придётся производить после регистрации сигнала, на этапе его обработки.

Такая процедура решает только проблему определения фаз фурье-компонент

изображения, но не их модулей. Однако именно это и является нашей главной заботой: модули фурье-компонент могут быть эффективно найдены методом спекл-интерферометрии.

Очередной вопрос, который теперь возникает, касается технической осуществимости такого измерения правых частей системы (50), при котором достаточно полно использовался бы световой поток, приходящий от наблюдаемого объекта. Этому вопросу посвящен следующий параграф.

Формирование изображения с помощью телескопа с безызбыточной апертурой.

В предыдущем параграфе предполагалось, что правые части уравнений (50) могут быть измерены для каждой пары субапертур независимо. В действительности же традиционный телескоп для этого не приспособлен. Принцип его действия определяет, что результаты измерения функции когерентности для всех пар субапертур, которые имеют одно и то же значение вектора смещения

$$d_{ij} = r_j - r_i \quad (51)$$

и потому участвуют в измерении функции когерентности для одного и того же значения аргумента, просто складываются друг с другом и не могут быть разделены последующей обработкой. Поэтому накопление сигнала путём арифметического усреднения результатов отдельных измерений является неотъемлемым свойством телескопа, которое не может быть преодолено какими-либо компромиссными решениями. Чтобы осуществить желаемый способ пространственного накопления сигнала, необходимо разделить значения функции когерентности, относящиеся к одному и тому же значению аргумента, но передаваемые разными парами субапертур, и уже потом выполнять необходимые действия по накоплению сигнала на этапе постдетекторной обработки. Для этого нужен новый способ формирования изображений, отличный от того, который осуществляется традиционным телескопом.

Простейшая идея в этом направлении состоит в том, чтобы исключить из набора субапертур такие пары, которые имеют одно и то же значение вектора смещения d_{ij} . Этого можно достичь, поместив на апертуру телескопа маску, закрывающую все нежелательные субапертуры. В результате, все суммы, о которых идёт речь, будут содержать только по одному слагаемому. Такие маски называются безызбыточными. Изображения, получаемые таким способом, имеют существенный недостаток: безызбыточная апертура не может передать полностью всю область пространственных частот, которую передаёт полная апертура телескопа [20]. Поэтому необходимо получить несколько изображений с разными апертурными масками, в совокупности передающими всю доступную телескопу область пространственных частот. Объединение результатов путём решения системы уравнений (50) надлежит производить на этапе постдетекторной обработки.

Эту идею предложили Родс и Гудмен [21] в 1973 г. Будучи безупречной в принципиальном отношении, она имеет два существенных практических недостатка. Во-первых, при таком способе наблюдения большая часть светового потока теряется на апертурной маске. Во-вторых, получение необходимых данных для реконструкции изображения требует нескольких экспозиций (с разными масками). Эти недостатки были устранены в [22].

Применение многолучевого интерферометра. Другой подход к этой задаче состоит в обобщении идеи звёздного интерферометра Майкельсона [23]. Интерферометр Майкельсона можно рассматривать как телескоп с апертурной маской, содержащей только две субапертуры. Вектор их относительного смещения определяет центральную частоту того единственного частотного окна, которое передаётся этим интерферометром. Если к нему добавить третью субапертуру, он будет передавать уже три частотных окна с центральными частотами d_{12} , d_{23} и d_{31} . Эта конфигурация апертуры является безызбыточной и пригодна для использования. Последовательно добавляя новые субапертуры при сохранении безызбыточности, мы получим существенное расширение области пространственных частот, передаваемых интерферометром. Однако, в конце концов, возможность увеличения числа субапертур при условии безызбыточности исчерпается, а полное покрытие области пространственных частот, доступной телескопу при данном его диаметре, так и не будет достигнуто [20]. При дальнейшем добавлении новых субапертур появится дублирование измерений функции когерентности и сложение их результатов, что противоречит рассматриваемой идее накопления сигнала.

Выход из положения опять подсказывает идея звёздного интерферометра Майкельсона.

Чтобы увеличить вектор смещения d_{12} за пределы диаметра телескопа, Майкельсон применял перископическую систему. Аналогичная система может быть применена и в нашем случае, но с другой целью: чтобы изменить вектор смещения между субапертурами и сделать его на выходе перископической системы отличным от всех уже имеющихся значений. С технической точки зрения такое преобразование апертуры удобнее делать в выходном зрачке телескопа. После такой перестановки субапертур изображение, сформированное вторичным объективом, уже не будет изображением объекта в обычном смысле, а будет представлять собой интерферограмму, в которой каждой паре первичных субапертур будет соответствовать своя пространственная частота, отличная от всех других. Разделяя эту интерферограмму на фурье-компоненты при дальнейшей обработке, мы получим значения функции когерентности для каждой пары первичных субапертур отдельно. Это позволяет записать систему уравнений (50) и найти из неё невозмущённые атмосферой значения фаз фурье-компонент изображения.

Эта идея была предложена в [24] и независимо, но несколько позже в [25]. Более обстоятельно она изложена в [26]. Во всех этих работах атмосфера предполагается изопланатичной. В работе [27] показано, что этот метод может быть осуществлён и при слабой неизопланатичности атмосферы. В [26, 28] указано на возможность устранять этим способом влияние не только атмосферы, но и аберраций оптики. В [29] указано на целесообразность применения интерферометрических телескопов в космосе, несмотря на отсутствие атмосферы, для исключения фазовых искажений, возникающих из-за вибрации и температурной деформации оптики. В [28] предложено строить многозеркальные телескопы по принципу многолучевого интерферометра. В [30] указано на целесообразность сочетать адаптивную оптику с интерферометрическим принципом формирования изображения. Возможность успешного достижения дифракционного предела разрешения с помощью интерферометрического метода продемонстрирована путём компьютерного моделирования в [31, 29, 32].

Вопросы, связанные с интерферометрическим методом формирования изображений. В связи с новым способом формирования астрономических изображений возникает ряд вопросов, на которые необходимо дать ответ, прежде чем пытаться осуществить новый метод на практике. Эти вопросы касаются, в основном, корректной математической постановки задачи, существования и способов отыскания необходимых конфигураций апертуры, вопросы оптимального выбора конфигураций и устойчивости метода к влиянию атмосферы в присутствии шума регистрации. Ниже кратко излагаются основные вопросы и известные на сегодняшний день ответы на них.

(1) Случайные погрешности измерения правых частей системы (50) делают её несовместной. Как корректно ставить задачу?

Надо ставить задачу отыскания наиболее вероятных значений искомых фаз при заданных значениях правых частей [26]. В простейшем случае для этого годится метод наименьших квадратов.

(2) Существуют ли конфигурации входной апертуры, обеспечивающие определённую систему (50)?

Примеры таких конфигураций приведены в работах [33, 34, 35] (рис. 2.12.3).

(3) Как искать необходимые конфигурации?

В статьях [36, 37] и монографиях [38, 39] излагаются регулярные методы синтеза конфигураций входной и выходной апертур интерферометра. В отчёте [40] и статьях [41-43] для этого предлагается метод случайного поиска и приводятся результаты его применения. Примеры конфигураций, найденных методом случайного поиска, приведены на рис. 2.12.4.

(4) По каким показателям следует оптимизировать выбор конфигураций входной и выходной апертур интерферометра?

Что касается конфигурации входной апертуры, то первым и главным требованием является её жёсткость, т.е. определённость написанной для неё системы уравнений (50). Многие конфигурации, даже с большим числом элементов, не являются жёсткими. Так, конфигурация, состоящая из элементов, расположенных по периметру правильного шестиугольника, не является жёсткой ни при каком размере шестиугольника [44]. Однако она становится жёсткой при добавлении единственного элемента в центре шестиугольника.

Вторым важным критерием оптимизации является скалярная информативность. Следует стремиться, чтобы она была возможно больше. Кроме того, следует выбирать конфигурации, обеспечивающие более равномерное распределение информативности по

пространственному спектру изображения или преимущественную информативность на высоких пространственных частотах. Этот вопрос детально рассмотрен в [6, 40].

Для выходной апертуры следует стремиться к минимальным размерам апертуры при заданном числе элементов [41].

(5) Какова устойчивость метода к атмосферным искажениям? Иначе говоря, действительно ли многолучевой интерферометр способен в реальных условиях дать лучшее изображение, чем традиционный телескоп?

В работе [45] теоретически показано, что информативность (по Фишеру) наблюдения с помощью интерферометра в присутствии атмосферы для типичной конфигурации составляет от 90 до 99 процентов от его информативности в отсутствии атмосферы. В работах [31, 29, 32] высокая устойчивость интерферометра к атмосферным искажениям подтверждена путём компьютерного моделирования.

Адаптивная оптика. Применять адаптивную оптику в наблюдательной астрономии для компенсации фазовых искажений в атмосфере было предложено в 1953 году [46]. Но, согласно легенде, она была успешно применена Архимедом на практике в целях обороны ещё в конце 3 века до н.э. Кроме того, эти идеи развивал Леонардо да Винчи. В последние десятилетия адаптивная оптика постепенно входит в наблюдательную практику [47]. В некоторых случаях она даёт блестящие результаты [48]. Но получить их обычно удаётся в инфракрасном диапазоне, где фазовые искажения меньше, чем в видимой области. Её продвижение в видимую область пока ещё нельзя считать триумфальным, хотя и здесь иногда удаётся получить впечатляющие результаты [49, 50].

При создании адаптивного телескопа приходится решать сложную задачу диагностики текущего состояния атмосферы на пути лучей от объекта к телескопу [47]. Задача оптимальной обработки астрономического сигнала теперь дополняется такой же задачей для вспомогательного, диагностического сигнала.

Для диагностики атмосферы определённую пользу мог бы принести многолучевой интерферометр, описанный выше. Его применение для этой цели может быть двояким. Один вариант состоит в том, чтобы измерять с его помощью фазовые искажения вспомогательной волны, предназначенной для зондирования атмосферы [51]. При этом изображение исследуемого объекта строится телескопом с обычной оптической схемой, но с гибкими оптическими поверхностями. Второй вариант может состоять в том, чтобы строить интерферограмму объекта с помощью многолучевого интерферометра (или многозеркального интерферометрического телескопа [28]), обрабатывать её в реальном времени и найденные при этом значения фазовых искажений (непосредственно для волны, проходящей от объекта!) использовать для управления оптической поверхностью.

Первый вариант сложнее и ненадёжнее, однако он пригоден при как угодно слабом сигнале от объекта. Второй вариант намного предпочтительнее при достаточно сильном световом потоке от объекта. Однако когда световой поток оказывается настолько слабым, что за время экспозиции от объекта приходит лишь несколько фотонов, эффективная реконструкция изображения объекта по одной экспозиции становится затруднительной, а затем и невозможной. Тогда этот вариант становится неприменимым.

Возникает вопрос: а существует ли вообще какая-нибудь возможность накопить сигнал и реконструировать по нему изображение объекта при таком слабом световом потоке? Этому вопросу посвящён следующий параграф.

Накопление сигнала в режиме счёта фотонов

Когда мы имеем дело со слабым световым потоком, мы видим, что он состоит из отдельных фотонов. Для измерения таких потоков стараются по мере возможности использовать светоприёмник в режиме счёта фотонов. Число фотонов, зарегистрированных при наблюдении, пропорционально интенсивности потока и времени экспозиции. Если наблюдение протяжённого объекта ведётся в расчёте на преодоление мешающего влияния атмосферы, время экспозиции должно быть меньше времени заморозенности атмосферы. Для слабых объектов это приводит к тому, что за время экспозиции приходит только несколько фотонов. Такое «изображение» мало похоже на истинное изображение объекта. Оно сильно возмущено квантовым шумом. Если среднее число фотонов за одну экспозицию намного меньше единицы, большинство кадров не будет содержать ни одного фотона и окажется бесполезным для исследования. Кадр, содержащий n фотонов, будет встречаться

с вероятностью α^n , где α приближённо пропорционально интенсивности интегрального потока от объекта. Поэтому требуется какая-то процедура временного накопления сигнала.

Можно разбить фокальную плоскость на клетки размером меньше элемента разрешения и подсчитывать число фотонов для каждой клетки в отдельности. Чтобы набрать достаточную статистику, потребуется суммирование по большому числу кадров. Такое накопление эквивалентно съёмке объекта с длительной экспозицией. Поскольку здесь каждый зарегистрированный фотон учитывается индивидуально, независимо от других, в работе [24] оно названо накоплением первого порядка. Оно имеет свой смысл, но не открывает пути к достижению дифракционного разрешения телескопа.

Если же мы попытаемся осуществить спекл-интерферометрию в режиме счёта фотонов, эффект будет другим. Если в кадре зарегистрированы фотоны с координатами $r_1, r_2, \dots, r_n$, его автосвёртка

$$a_2(s) = J(r) \otimes J(r) \quad (52)$$

будет суммой дельта-функций, сосредоточенных в точках

$$s_{ij} = r_i - r_j. \quad (53)$$

Накапливая сигнал путём суммирования не кадров, а их автосвёрток, при достаточной статистике мы получим (после соответствующей частотной коррекции) автосвёртку истинного изображения объекта, как и при обычной спекл-интерферометрии. Такое накопление сигнала названо в [24] накоплением второго порядка. В этом случае результат накопления первого порядка может послужить нулевым приближением при попытке реконструкции изображения по его спектру методом [16].

Возникает вопрос: может ли оказаться для чего-то полезным накопление сигнала более высокого порядка? Так, накопление третьего порядка позволят найти тройную автосвёртку изображения

$$a_3(p, q) = J(r) \otimes J(r) \otimes J(r), \quad (54)$$

а значит, и её фурье-образ, называемый биспектром изображения. Показано, что при определённых условиях из биспектра изображения, полученного с помощью традиционного телескопа, можно частично исключить атмосферные искажения и приближённо получить неискажённое атмосферой изображение объекта. Ещё в 1958 году Дженисон [52] заметил, что произведение трёх фурье-компонент изображения, передаваемых тремя субапертурами, не содержит фазовых искажений. На этом факте основан предложенный им метод замыкания фаз. В работе [24] показано, что подобным же образом фазовые искажения не содержатся в биспектре интерферограммы, полученной с помощью многолучевого интерферометра. Это открывает возможность реконструировать неискажённое изображение объекта по последовательности кадров, в каждом из которых было зарегистрировано не менее трёх фотонов.

Здесь необходимо отметить одно существенное обстоятельство. Чтобы накопить необходимое количество случайных событий, требуется время, обратно пропорциональное вероятности такого события. Поэтому время, необходимое, чтобы набрать достаточную статистику, обратно пропорционально интенсивности светового потока в первой степени для накопления первого порядка, во второй степени – для второго порядка и в третьей – для накопления третьего порядка. Это означает, что для слабого объекта накопление третьего порядка обходится значительно дороже, чем обычные способы накопления.

Тем не менее, режим счёта фотонов и адекватная обработка результатов наблюдения могли бы существенно повысить эффективность наблюдения слабых объектов в трудных условиях, например, при исследовании гравитационных миражей.

Заключение

Подводя итог сказанному выше, картину, которую мы видим, можно кратко охарактеризовать следующим образом.

Обсуждаемая проблема имеет давнюю историю, за это время достигнуты значительные успехи, но многие вопросы по-прежнему ждут своего решения. Задачи,

которые стоят в этой области перед теоретиком, сложны и требуют серьёзного и ответственного подхода. Таким подходом является статистический подход, восходящий к Байесу, Лапласу, Гауссу и Лежандру. Он является ключевым для экспериментальной физики и наблюдательной астрономии, однако на сегодняшний день это осознано далеко не всеми специалистами.

Как и в других подобных случаях, проблему максимального извлечения информации можно решить только на основе детального изучения факторов, препятствующих достижению цели, в данном случае – влияния атмосферы на астрономическое изображение.

Существует целый ряд идей, как преодолеть мешающее влияние атмосферы и приблизиться к дифракционному пределу разрешения телескопа. Эти идеи дают или могут дать определённый практический эффект, но все они далеки от полного решения проблемы. Исследования в этой области должны продолжаться. Они должны быть направлены как на поиск новых приёмов формирования изображений, так и на поиск оптимальных способов обработки изображений, полученных старыми способами.

Особого упоминания в этой связи заслуживает задача оптимальной фильтрации последовательности мгновенных изображений, полученных с помощью традиционного телескопа. Существующие методы их обработки не полностью используют содержащуюся в них информацию. Поэтому есть основания полагать, что возможности обычного телескопа ещё далеко не исчерпаны.

Чтобы закончить этот разговор на оптимистической ноте, приведём в качестве иллюстрации результаты численного моделирования наблюдения малоразмерного астрономического объекта и обработки полученной последовательности мгновенных изображений с целью реконструкции изображения объекта с дифракционным разрешением телескопа (рис. 2.12.5). В первом ряду этого рисунка представлено следующее: а – эталонное изображение тест-объекта, b – изображение, построенное телескопом без атмосферы, с – изображение, построенное идеальной изображающей системой с тем же диаметром апертуры, но с равномерной передачей всех пространственных частот в пределах полосы пропускания, d – результат восстановления изображения b винеровским фильтром в отсутствие шума регистрации. Видно, что изображения с и d практически не отличаются друг от друга. Ряды А, В и С – результат моделирования наблюдения тест-объекта а с помощью телескопа сквозь турбулентную атмосферу. В каждом ряду 1, 2 и 3 – примеры мгновенных изображений, 4 – результат усреднения всей серии изображений, 5 – результат восстановления изображения 4 оптимальным винеровским фильтром, 6 – результат реконструкции изображения объекта по его энергетическому пространственному спектру, накопленному по последовательности изображений. В каждое мгновенное изображение внесён квантовый шум, соответствующий интенсивности светового потока. А – 100 фотонов на дифракционный элемент разрешения в одном кадре и 10 кадров, В – то же, но 100 кадров, С – 1000 фотонов и 100 кадров. Видно улучшение результатов сверху вниз.

Литература

1. *Корниенко Ю.В.* Бастион науки. Раздел 1.7 этой книги.
2. *Де Гроот М.* Оптимальные статистические решения. – М.: Мир, 1974. – 491 с.
3. *Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С.* Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // УФН, 1970. – Т. 202, Вып. 3. – С. 345-386.
4. *Корниенко Ю.В.* Статистический подход к фильтрации и информативность изображения // Радиофизика и электроника. – Харьков: ИРЭ НАН Украины, 2005. – Т. 10, спецвыпуск. – С. 652-676.
5. *Ченцов Н.Н.* Информационная матрица // Математическая энциклопедия. – М.: Советская Энциклопедия, 1979. – Т. 2. – С. 655.
6. *Корниенко Ю. В., Нгуен Суан Ань, Копилович Л. Е., Дулова И. А, Бондаренко Н. В., Масалов Д. С., Мелкумова Л. Я., Станкевич Д. Г. и др.* Исследование предельных возможностей и разработка методов восстановления изображений при наблюдении объектов сквозь среду со случайными неоднородностями показателя преломления // Отчет по НИР «Предел», N Госрегистрации 01.92U027983, 1993 г. – 236 с.

7. Корниенко Ю.В., Дулова И.А., Нгуен Суан Ань. Винеровский подход к определению оптических характеристик поверхности планеты по результатам фотометрических наблюдений // Кинематика и физика небесных тел, 1994. – Т. 10, N5. – С. 69-76.
8. Парусимов В.Г., Корниенко Ю.В. Об отыскании наиболее вероятного рельефа участка поверхности по его оптическому изображению // Астрометрия и астрофизика. – Киев: Наукова думка, 1973. – Вып. 19. – С. 20-24.
9. Van Diggelen, J. A photometric investigation of the slopes and heights of the ranges of hills in the maria of the Moon // Netherlands Astron. Inst. Bull. – 1951. – Т. 11. – Р. 283-289
10. Коваль И. К. // Астрон. циркуляр. – 1965. – № 317. – С.1.
11. Барабашов Н.П., Гаража В.И., Дудинов В.Н. // АЖ, 1966. – Т. X/III, вып. 1.
12. Дудинов В.Н. О возможности учета погрешностей, вызванных замытием изображения планет // Астрономический журнал. – 1969. – 46, вып. 5. – С. 1064-1073.
13. Содин Л.Г. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере // Письма в АЖ. – 1976. – 2. – С. 554-558.
14. Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images // Astron. Et astrophys. – 1970. – V. 6, No 1. – Р. 85-87.
15. Петров В. А. О восстановлении функций по модулю преобразования Фурье // Весн. Харьк. ун-та. – 1981. – № 223, вып. 16. – С. 25-33.
16. Корниенко Ю. В. О возможности восстановления изображения слабого объекта, искаженного влиянием земной атмосферы // Докл. АН УССР, Сер. А. – 1977. – № 10. – С. 931-933.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред /Изд-е 2-е. Теоретическая физика, Т.8. – М.: Наука, 1982. – 622 с.
18. Fienup J. R. Reconstruction of the object from the modulus of its Fourier transform // Opt. Lett. – 1978. – 3, № 1. – Р. 97-99.
19. Бабичев А. А., Корниенко Ю. В., Парусимов В. Г., Станкевич Д. Г., Усиков А. Я. Цифровая обработка астрономических изображений // Тр. 14 Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. – М., 1980. – С. 436-439.
20. Kopilovich L. E. Construction of Non-redundant Masks over Square Grids Using Difference Sets // Optics Commun. – 1988. – 68, № 1. – Р. 7-10.
21. Rhodes W. T., Goodman J. W. Interferometric technique for recording and restoring images by unknown aberration // J. Opt. Soc. Amer. – 1973. – 63, No. 6. – Р. 647-657.
22. Уваров В.Н. О возможности получения изображений с дифракционным разрешением при наблюдении сквозь неоднородную среду // Докл. АН УССР, Сер. А. – 1979. – № 10. – С. 839-841.
23. Michelson A. A., Piese F. G. Measurement of the diameter of Alpha Orionis with interferometer // Astrophys. J. – 1921. – 53. – Р. 249-259.
24. Корниенко Ю. В., Уваров В. Н. Накопление сигнала при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу // Докл. АН УССР, Сер. А. – 1987. – № 4. – С. 60-63.
25. Roddier F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays // J. Opt. Soc. Amer. – 1987. – A4, № 8. – Р. 1396-1401.
26. Корниенко Ю. В. Интерферометрический подход к проблеме видения сквозь турбулентную атмосферу. I. // Кинем. и физ. Небесн. тел, 1994. – Т. 10, N 2. – С.98-106.
27. Корниенко Ю.В., Уваров В. Н. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при наблюдении астрономического объекта сквозь неизопланатичную атмосферу // Доклады АН УССР, сер.А, 1988. – N 10. – С. 62-64.
28. Корниенко Ю.В., Пугач В.В. Интерферометрический метод формирования изображений как основа построения многозеркальных телескопов // Вісник астрономічної школи, 2004. – Т. 3, № 2. – С.70-80.
29. Пугач В.В. Интерферометрический метод формирования изображений: обзор результатов и моделирование // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины, 2004, спецвыпуск. – Т.9. – С. 140 – 153.
30. Корниенко Ю.В., Копилович Л.Е., Дулова И.А. и др. Отчет по НИР «Исследование возможностей и разработка физических основ построения изображающих систем оптического и радиодиапазонов, устойчивых по отношению к фазовым искажениям» // № госрегистр. 01.98U003916, ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины, 2000. – 299 с.

31. Kornienko. Yu., Pugach V.V. Interferometric method for image formation: investigation of potentialities by means of computer simulation // MSMV'2004/ The Fifth International Kharkov Symposium 'on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves", Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2004. – P. 902-904.
32. Kornienko Yu., Pugach V. Interferometric method for image formation: the basic ideas and computer simulation // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement: Proceedings of the International Conference "Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future", 2005. – No 5. – P. 534-536.
33. Уваров В.Н., Корниенко Ю.В., Лейферов В.А., Валяев А.Ф., Пустряк Е.А. Разработка методов цифровой обработки изображений для астрономических и прикладных исследований // Книга 1. Отчет по НИР «Диабаз-2», № ГР 01.86 О 086551, 1990. – 163 с.
34. Kornienko Yu.V., Leyferov V.A. Studies of the interferometric method for forming astronomical images as to its resistance to phase distortions in atmosphere // Кинем. и физ. небесн. тел. – 1994. – 10, N1. – С. 65-67.
35. Корниенко Ю.В., Лейферов В.А., Пугач В.В. Информационная эффективность многолучевого интерферометра при наблюдении объекта сквозь неоднородную среду // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 1997. – Т. 2, N 2. – С.132-136.
36. Копилович Л.Е. Многолучевой оптический интерферометр: оптимизация выходной апертуры // Кинематика и физика небесных тел. – 1998. – 14, N 1. – С.180-185.
37. Kopilovich L.E. Non-redundant apertures for optical interferometric systems: maximization of the number of elements // Journal of Modern Optics. – 1998. – 45, No. 11. – P. 2417-2424.
38. Kopilovich L.E. Applications of difference sets to the aperture design in multielement systems in radio science and astronomy. In "Difference Sets, Sequences and Their Correlation Properties" // A.Pott et al (eds), NATO Sci.Ser., Ser.C, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 1999. – V. 542. – P. 297-330.
39. Kopilovich L.E., Sodin L.G. Multielement System Design in Astronomy and Radio Science // Kluwer Academic Publishers (Dordrecht/Boston/London), The Netherlands, 2001 – Astrophysics and Space Science Library, V.268. – 183 p.
40. Корниенко Ю. В., Нгуен Суан Ань, Копилович Л. Е., Дулова И. А., Бондаренко Н. В., Масалов Д. С., Пугач В.В. и др. Разработка методов оптимального синтеза систем радиовидения и обработки радиоизображений // Отчет по НИР "Промінь", N Госрегистрации 01.96И006117. – 203 с.
41. Корниенко Ю.В. Интерферометрический метод формирования изображений и проблема оптимизации апертур интерферометра // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины, 2000. – Т. 5, N 1. – С. 186 – 190.
42. Корниенко Ю.В. Построение безызбыточных антенных конфигураций на квадратной решетке методом случайного поиска // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины, 2000. – Т.5, № 3 – С. 148-154.
43. Корниенко Ю.В. Построение безызбыточных антенных конфигураций на гексагональной решетке методом случайного поиска // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины, 2002. – Т.7, №1. – С. 142-153.
44. Корниенко Ю.В., Дулова И.А., Копилович Л.Е. и др. Отчет по НИР «Квазиоптические и оптические принципы и методы в радиофизических исследованиях» (шифр «ОПТ») // № госрегистрации 01.00U006440. Книга 2 «Оптические методы в коротковолновой части радиодиапазона и нелинейная динамика электронного генератора», ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины, 2003. – 253с.
45. Корниенко Ю.В. Устойчивость интерферометрического метода формирования изображений к фазовым искажениям волнового фронта // Доп. НАН України. – 2000. – № 5. – С. 78-82.
46. Babcock H.W. Publ. on the Astronomical Soc. –1953. – 65, No. 386. – P. 229.
47. Бакут П.А., Устинов Н.Д., Троицкий И.Н., Свиридов К.Н. Методы обработки световых полей при наблюдении через турбулентную среду // Зарубежная радиоэлектроника, 1977. – № 1. – С. 3-29.
48. Roggemann M.C., Welsh B.M., and Fugate R.Q. Improving the resolution of ground-based telescopes // Reviews of Modern Physics, 1997. – № 69. – С. 437-505.

49. Баранов Ю.В., Новиков С.Б., Овчинников А.А. Улучшение разрешения телескопа с помощью компенсатора наклонов волнового фронта // Методы повышения эффективности оптических телескопов / Под ред. Гладышева С.А. – М.: Изд-во Моск. университета, 1987. – 180 с.
50. Баранов Ю.В., Белкин Н.Д., Горбинский В.Н., Новиков и др. // Астрономический циркуляр, 1984. – № 1929. – С.2.
51. Корниенко Ю.В., Дулова И.А., Пугач В.В., Масалов Д.С., Скуратовский С.И., Бондаренко Н.В. Книга 2 «Взаимодействие электромагнитного излучения видимого, терагерцового и гигагерцового диапазонов с материальными средами естественного и искусственного происхождения» // Отчет по НИР «Методы и средства исследования процессов взаимодействия электромагнитных волн и полей с различными материальными объектами естественного и искусственного происхождения и изучение их макроскопических и микроскопических свойств» (шифр «НАПРЯМОК»), № госрегистрации 0102U003140. / отв. рук. д. ф.-м. н. А.И. Фисун. – Харьков: ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины, 2006. – 283 с. – С. 123-202.
52. Jenison R. C. A phase sensitive interferometer technique for the Fourier transform spatial brightness distributions of small angular extent // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1958. – 118. – P. 278-384.

2.13. АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЗВЕЗДНОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

д.ф.-м.н. В. А. Захожай

Прежде всего, поясним, что мы понимаем под вынесенными в заголовок статьи терминами «астрофизический» и «звездноастрономический». Первый из них относится ко всем объектам вне Солнечной системы. Второй относится к изучению систем различного порядка, состоящих, прежде всего, из звезд, в том числе и других галактик. Заметим также, что в последние годы в число объектов, изучаемых звездной астрономией, вошли кроме звезд и межзвездной среды также субзвезды и экзопланеты. Астрофизические и звездноастрономические исследования в Харьковском университете велись на протяжении более чем ста лет. Однако в отличие от астрометрических исследований и работ по изучению Солнца и тел Солнечной системы развивались они неравномерно. Периоды интенсивного их развития сменялись периодами, когда они почти не проводились.

Период зарождения и становления

Исследования в области звездной астрономии начались в Харькове в середине 90-х годов XIX века с назначением в 1894 г. на должность директора обсерватории и заведующего кафедрой астрономии университета известного астронома Людвиг Оттовича Струве, внука основателя Пулковской обсерватории В. Я. Струве. До приезда в Харьков Л. О. Струве стажировался в Пулковской, Боннской, Миланской, Лейпцигской обсерваториях и работал в обсерватории Дерптского университета. Его подход к преподаванию астрономических дисциплин и обработке материалов астрономических наблюдений позволил существенно укрепить кафедру астрономии и способствовал становлению астрономической обсерватории как научного учреждения. Он воспитал таких впоследствии известных ученых, как Н. Н. Евдокимов, Н. П. Барабашов, В. Г. Фесенков и др., создал условия для расширения научной тематики, которая до начала 90-х годов ограничивалась только астрометрическим направлением. Так, благодаря усилиям В. Г. Фесенкова были начаты астрофизические и планетные исследования в Харьковской обсерватории. Это создало условия для Б. П. Герасимовича (выпускника Харьковского университета 1914 г.) после стажировки в 1916 г. в Пулковской обсерватории начать свои исследования в области звездной астрономии, а для выпускника 1919 г. Н. П. Барабашова – продолжить развитие планетных исследований.

Основные научные работы Л. О. Струве относятся к разделам астрометрии, которые позволяют изучать кинематику звезд и звездных систем. Поэтому его научные интересы в области звездной астрономии сосредотачивались на изучении вращения Галактики и определении орбит двойных звезд. Еще до прихода на работу в Харьковский университет в 1887 г. (то есть за 40 лет до Я. Оорта), Л. О. Струве не только развивал представления о вращении Галактики, но и оценил скорость ее вращения в $0,43''$ в год при современном значении $0,51''$ в год.

Результаты диссертации Н. Н. Евдокимова по определению параллакс звезд, полученные на меридианном круге, имели большое значение для звездной астрономии и проблемы определения расстояний в Галактике (Евдокимов, 1912). Это один из первых каталогов звездных параллакс содержащий данные о 59 звездах. Он был опубликован в 1912 году отдельным изданием на немецком языке. За эту работу Н. Н. Евдокимов был отмечен премией Русского астрономического общества.

В. Г. Фесенков в Харькове провел фотометрические наблюдения 1155 звезд, находящихся в пределах 11° по склонению от северного Полюса мира. Эти наблюдения легли в основу фотометрического каталога (Фесенков, 1926). В конце харьковского периода своей научной деятельности у В. Г. Фесенкова начали формироваться представления о совместном образовании планетной системы и Солнца. Через сорок лет, предполагая, что такой процесс характерен для других планетных систем, он предложил искать планетные системы у других звезд по наличию у них поляризованного излучения, вызванного продуктами

распада астероидов и комет, или вещества, оставшегося от реликтового протопланетного облака. Вообще же к проблемам астрофизики и звездной астрономии, к вопросам звездообразования В. Г. Фесенков неоднократно обращался в последующем.

В целом период работы в рассматриваемых областях астрономии в Харьковской обсерватории 1894 – 1931 г.г. можно охарактеризовать как исследования кинематики звездных систем различного уровня, морфологии Галактики, физических параметров и эволюции звезд, природы звездных недр и атмосфер, пылевых и газовых туманностей, природы переменности звезд.

Большинство работ, опубликованных сотрудниками Харьковской обсерватории по обсуждаемой тематике в этот период, принадлежат Б. П. Герасимовичу. Он изучал природу планетарных туманностей, исследовал физические условия в них и светимости центральных белых карликов (1927 г.), влияние их гравитационных сил на форму планетарных туманностей (1922, 1925 г.г.). В круг его интересов входило изучение структуры Галактики с учетом межзвездного поглощения, которое определялось из наблюдений цефеид (1929, 1931 г.г.). В это же время им была разработана теория ионизации в звездных атмосферах и в межзвездном газе (1929, 1930 г.г.). Большое число работ Б. П. Герасимовича посвящено исследованию новых и переменных звезд. Б. П. Герасимович был одним из первых среди астрономов, рассмотревший ряд вопросов астрофизики космических лучей.

Во время своей научной командировки в США (1926 – 1929 г.г.) Б. П. Герасимович продуктивно сотрудничал со многими известными американскими астрономами. Им совместно с В. Я. Лейтеном было определено расстояние Солнца от галактической плоскости (1927 г.). Совместно с Д. Х. Мензелом были выполнены работы по изучению процессов освобождения звездной энергии в их недрах с точки зрения статистической механики (1928, 1929 г.г.). С О. Л. Струве рассмотрел физические условия в межзвездном газе и формирование в нем линий поглощения (1929 г.). Исследования цвета долгопериодических переменных были выполнены совместно с Х. Шепли (1930).

Интенсивность научной работы Б. П. Герасимовича в харьковский период его деятельности (1918 – 1931 г.г.) характеризуется почти 120 публикациями. Среди них сто научных статей и около 20 учебных пособий и научно-популярных брошюр и статей. Особый интерес представляет изданная в Харькове в 1925 г. его книга «Вселенная при свете теории относительности».

В этот период фотометрические и спектрофотометрические наблюдения новых (в Орле, Лебеде, Ящерице) (1919, 1923, 1929 г.г.) и переменных звезд (1928 г.), звездных скоплений (1924 г.) проводил Н. П. Барабашов. Он также рассматривал общие вопросы исследования переменных звезд (1924 г.), природы новых звезд (1924, 1925, 1929 г.г.) и эволюции звезд (1924 г.).

Прежде чем переходить к следующему этапу работ, нужно остановиться на научной деятельности О. Л. Струве. Отто Струве окончил Харьковский университет в 1919 г.; события первых послереволюционных лет в нашей стране привели к тому, что он оказался за ее пределами, в США. И хотя необычайно плодотворная научная, научно-организационная и научно-педагогическая деятельность О. Л. Струве протекала вне его *alma mater*, наш университет имеет все основания гордиться выдающимся своим воспитанником. Основные научные работы О. Л. Струве относятся к звездной спектроскопии. На протяжении многих лет он занимался изучением спектрально-двойных звезд и звезд ранних спектральных классов, исследовал спектры сотен двойных звезд, определил их орбиты и массы. В 1929 г. О. Л. Струве открыл уширение линий водорода и гелия электрическими полями в спектрах В-звезд и показал, что это явление может быть использовано для определения светимости звезд. Им было обнаружено существование крупномасштабных турбулентных потоков в атмосферах звезд-сверхгигантов. Совместно с Э. Фростом и С. Барретом он определил по лучевым скоростям 368 В-звезд параметры движения Солнца. В 1929 г. совместно с Г. А. Шайном О. Л. Струве предложил метод определения скоростей осевого вращения звезд и показал, что у горячих звезд эти скорости на экваторе достигают значений порядка 100 км/с. Совместно с К. Элви он установил статистическую зависимость между скоростью вращения и спектральным классом. Изучая двойные звезды с эмиссионными линиями в спектре, О. Л. Струве нашел, что эмиссии возникают в газовых оболочках и кольцах, появляющихся в результате истечения вещества из экваториальных областей быстро вращающихся звезд, а также в неустойчивых двойных системах. Ряд работ О. Л. Струве посвящен изучению межзвездной среды. По спектрам более чем 2000 горячих звезд он исследовал межзвездные линии H и K кальция и установил зависимость их интенсивности от расстояния, оценил

среднюю плотность межзвездного кальция и показал, что он участвует в галактическом вращении. С помощью впервые созданного им совместно с К. Элви небулярного спектрографа О. Л. Струве доказал существование межзвездного водорода, открыл многие диффузные и отражательные туманности.

30-е – 60-е годы XX столетия

После перехода Б. П. Герасимовича на работу в 1931 г. в Пулковскую обсерваторию объем астрофизических исследований звезд и их систем существенно уменьшился в Харьковском университете. Проводились лишь эпизодические исследования переменных (Страшный, 1932) и новых звезд (Саврон, 1935, Барабашов и Гордон, 1948). Изучались некоторые общие вопросы звездной астрономии (Пархоменко, 1932, Саврон, 1935, Сырокомский, 1939). Работы Н. П. Барабашова были посвящены фотометрическим и спектрофотометрическим наблюдениям новых Геркулеса (1935, 1948 г.г.) и Ящерицы (1938 г.), туманности Ориона (1938 г.) и общей теории новых звезд (1936 г.).

К. Н. Савченко (выпускник Херсонского института народного образования) окончил аспирантуру Харьковского университета в 1934 г. С 1934 по 1940 г.г. он – старший научный сотрудник ХАО. В этот период он обращался к задаче о происхождении Солнечной системы (Савченко, 1936). Позднее, в период его научной деятельности в 1940 – 50-е годы в Одесском университете, где он занимал должность профессора кафедры астрономии, им рассматривалось совместное образования звезд и планетных систем на основе небесно-механического подхода к этой проблеме [1].

Во второй половине 1940-х годов после окончания аспирантуры ХГУ в Астрономической обсерватории и на кафедре астрономии работал И. М. Гордон. Его научные исследования в этот период были посвящены изучению переменных звезд (1945 – 1947 г.г.) и поглощения света во внегалактических звездных системах (1941, 1945, 1946 г.г.). Последующие работы И. М. Гордона связаны с развитием представлений о нетепловой природе радиоизлучения в спектрах различных космических объектов – Солнца, сверхновых и новых звезд, различных типов переменных звезд. Он доказал наличие нетепловой компоненты в радиоизлучении Солнца после хромосферных вспышек, тем самым установил первый случай роли нетеплового (синхротронного) излучения в астрофизических объектах. Итоги этих своих исследований И. М. Гордон подвел в большой статье, опубликованной в Ученых записках ХГУ (Гордон, 1957).

В период с 1950 г. до середины 70-х годов исследования по астрофизике и звездной астрономии в Харьковском университете не велись. В этот период выпускники кафедры астрономии, которые работали в других астрономических учреждениях, внесли определенный вклад в развитие астрофизики и звездной астрономии. Это доктор физ.-мат. наук В. С. Шевченко в Астрономическом институте АН Узбекистана (известна его монография [2]), доктора физ.-мат. наук В. С. Артюх и И. Н. Малов в Астрокосмическом центре Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, канд. физ.-мат. наук Л. М. Жмуркова и доктор физ.-мат. наук Е. Я. Гидалевич в Астрофизическом институте АН Казахстана.

Развитие звездной астрономии с 70-х гг. XX столетия по настоящее время

Возобновление исследований в Харьковском университете в области звездной астрономии произошло в середине 70-х годов. Это можно связать с двумя обстоятельствами – приходом нового поколения исследователей с соответствующими научными интересами и теми возможностями, которые открылись в связи с развитием в АО ХГУ нового научного направления по повышению углового разрешения наземных телескопов и созданием когерентно-оптического процессора для обработки изображений. Работы по определению диаметров звезд и характеристик тесных двойных систем методом спекл-интерферометрии подробно описаны выше в статье В. Н. Дудинова и др.

Исследовались также возможности применения метода спекл-интерферометрии к проблеме обнаружения планет у звезд (Захожай, 1978, 1979, 1981). Для анализа изображений, угловые размеры которых находятся на пределе углового разрешения, была создана специальная установка, позволяющая моделировать наблюдения в земных условиях телескопами с большой апертурой и интерферометрами длиной базы до 50 метров (Захожай, 1983). Был смоделирован тракт: космический объект, земная турбулентная атмосфера, телескоп с апертурой до 25 м. Была разработана методика применения метода спекл-интер-

ферометрии для поиска субзвезд и планет в окрестностях Солнца. Предпринимались попытки наблюдения затменно-переменных систем на БТА и отработывалась методика наблюдений широких двойных пар на 2,6-метровом телескопе им. Шайна и 50-см телескопе КрАО, оснащенный телевизионной установкой.

С целью развития идей о существовании и возможности поиска внесолнечных планет у ближайших звезд с конца 1970-х годов в обсерватории ведутся астрофизические и статистические исследования ближайших звезд (В. А. Захожай). Определение понятия планет как определенного класса космических тел Вселенной, а не только Солнечной системы, привело к предсказанию нового класса космических тел – субзвезд (Александров и Захожай, 1980), оценке вероятности существования планетных систем у звезд различной кратности (Захожай, 1983, 1994) и поиску субзвезд и планет различными наблюдательными методами. Проводятся также работы по изучению внутреннего строения субзвезд и химического состава их атмосфер (В. А. Захожай и А. И. Писаренко). К настоящему времени построены модели внутреннего строения субзвезд почти всего диапазона их масс в рамках неполитропной аппроксимации уравнения состояния вещества недр (Захожай и др., 1996, 1998, 1999, 2000, 2004, 2007), а также обосновывается химический состав атмосфер (1999 – 2001 г.г.), который согласуется с представлениями о существовании водородно-гелиевых планет (2001, 2003). Объяснена зависимость «масса – радиус» космических тел, в состав недр которых входит электронный газ различной степени вырождения и ионизации, что ставит в единый ряд такие разные по происхождению и идентичные по природе их недр космические тела, как белые карлики, субзвезды и водородно-гелиевые планеты. Эти исследования проводятся совместно с ННЦ ХФТИ (А. А. Яценко) и с НИИ химии ХНУ (Ю. Ф. Педаш, С. И. Котелевский).

Развитие статистических исследований окрестностей Солнца основывается на созданных в течение 1979 – 2002 г.г. каталогах звезд, включающих ранее не фигурирующие характеристики ближайших звезд, такие как массы и радиусы (Захожай, 1994, 2002), ИК-поток (Захожай и др., 1994), металличности (Захожай и Шапаренко, 1996). Обосновано разделение субзвезд на два типа (Захожай, 2001, 2003), одним из которых являются коричневые карлики.

Наблюдаемые свойства околосолнечного окружения рассматриваются в проявлениях галактической эволюции. Для этого используются обозначения, принятые в теории графов (Захожай, 1996), и свойства вероятностей ключевых событий эволюции Галактики с учетом существования в природе субзвезд (Захожай, 2003). Оценки показывают, что количество субзвезд, по-видимому, на порядок меньше количества звезд (Захожай, 2001, 2005). Число же планет в Галактике должно существенно превышать (по-видимому, на два порядка) число звезд и субзвезд (Александров и Захожай, 1983, Захожай, 1994).

С середины 70-х годов М. Ф. Ходячих активно проводились статистические исследования распределения в пространстве внегалактических объектов. Выявлено существенное уменьшение светимости квазаров со временем и цикличность изменения блеска в масштабе красного смещения (Ходячих, 1975). В распределении радиосветимостей квазаров также выявлена циклическая зависимость от красного смещения (Ходячих, 1979). Эволюцию светимостей удалось выявить у квазаров и всех квазизвездных объектов (Ходячих, 1982, 1983). Для видимого диапазона удалось выполнить оценки величины галактического поглощения по распределению квазаров на небесной сфере (Назаров, Ходячих, 1983). В 1990-х годах М. Ф. Ходячих предложил объяснять циклические изменения в распределении квазаров влиянием космологических гравитационных волн. Показано, что функция светимости квазаров не меняется со временем (1996 г.). В это время были проведены статистические исследования светимости, масс, размеров и моментов вращения галактик различных типов (Ходячих, 1995). В конце 90-х годов М. Ф. Ходячих предложил новый метод выявления звездных скоплений и выявил 4 скопления, три из которых ранее не были известны. Также были выявлены космологические периодичности в спектральных индексах на пяти частотах (Ходячих, 1995), в оптических (Ходячих, 1979, 1992) и радиосветимостях квазаров (Ходячих, 1988, 1990, 1998). По селективным и полным выборкам квазаров выявлены 5 периодов в их пространственном распределении, из которых 3 выявлены на высоком уровне значимости (Ходячих, 2003). По периодичностям в распределении пространственной плотности квазаров сделаны оценки безразмерной плотности Ω и космологической постоянной Ω_Λ . Последние из этих оценок дали значения $\Omega = 0,88$ $\Omega_\Lambda = 0,64$, что близко к значениям этих величин в современной стандартной космологической модели.

С 1980-х годов велись исследования альтернативной теории тяготения, согласно которой отсутствует горизонт событий (Верозуб, 1981, 2003). Исследовалась применимость эффекта Джозефсона для детектирования сил тяготения и сил инерции (1984 г.), а также возможность детектирования гравитационных волн с помощью других эффектов в сверхпроводниках (Верозуб, 1984, 1989, 1991, 1996); изучались общие свойства гравитации (Верозуб, 1991, 1995, 1999, 2001, 2002, 2003). В конце 90-х годов этими проблемами занимались также А. Е. Кочетов и Е. Ю. Банникова. Предметом их исследований являлся поиск наблюдаемых астрофизических проявлений метрико-полевого подхода в теории тяготения (Верозуб и Кочетов, 1999, 2002) и изучение сверхмассивного компактного объекта в центре Галактики (Банникова и Верозуб, 2001). В последнее время в нашей обсерватории начались работы, связанные с изучением свойств черных дыр (Заславский, 2007).

С 2001 г. Е. Ю. Банникова совместно с В. М. Конторовичем (РИ НАНУ) занимается теоретическими исследованиями таких структурных элементов активных ядер галактик, как джеты и торы. Моделирование в рамках диффузионной модели компактных структур джетов в радио- и рентгеновском диапазонах показало, что, сравнивая изображения структуры джетов на разных частотах и в разных диапазонах, можно получать информацию о неоднородности магнитного поля, величине максимальной энергии ускоренных частиц, скорости джета и т.д. Другим структурным элементом космических источников являются торы, которые при наличии циркуляции скорости превращаются в вихри. Было показано (Банникова и Конторович, 2003, 2004), что в случае тороидального вихря вырожденного нейтронного газа возникает минимальная масса динамического происхождения и область устойчивости, которая зависит от циркуляции. Это может объяснять наблюдаемый узкий интервал масс нейтронных звезд. Была предложена вихревая модель затеняющих торов активных ядер галактик, согласно которой дипольные тороидальные вихри, подкручиваемые излучением квазара, поставляют вещество в аккреционные диски (Банникова и Конторович, 2006, 2007). Это приводит к возникновению «аккреционно-ветровой» неустойчивости, которая объясняет наблюдаемую корреляцию между оптическими вспышками излучения квазаров и появлением парсековых компонент джетов.

В 1996 – 2006 г.г. Ю. В. Александровым был выполнен ряд работ, посвященных проблемам многомерной космологии. Сначала была рассмотрена метрическая эволюция вселенных с произвольной размерностью пространства и произвольным (в определенных пределах) уравнением состояния материи (Александров и Тараров, 1996). Затем была изучена метрическая эволюция многомерных вселенных в рамках двухкомпонентных моделей «физический вакуум + излучение» и «физический вакуум + вещество» (Александров, 2002). Наконец, были рассмотрены двухкомпонентные модели эволюции многомерных вселенных с произвольным уравнением состояния материи. Кроме того, методом обобщенного потенциала была исследована релятивистская задача двух тел в метрике, создаваемой материальной точкой (сферическим телом) на фоне равномерно заполняющего пространство физического вакуума. Результаты всех этих исследований изложены в учебном пособии «Основы многомерной космологии» (Александров, 2007). В 2004 было издано также пособие «Основы релятивистской космологии» (Александров, 2004).

Подведем некоторые итоги. Мы видим, что исследования в области физики звезд, звездной и внегалактической астрономии продолжались у нас в обсерватории более ста лет. Периоды относительного затишья сменялись периодами более интенсивного развития. Общее число публикаций по указанной тематике составляет более чем 300 наименований. Особенно весом вклад в эти исследования Б. П. Герасимовича. Таким образом, и в изучение далекого космоса астрономы Харьковского университета также внесли свой вклад.

Литература

1. Савченко К. Н. Космогония Канта и проблема происхождения малых тел Солнечной системы // Проблемы происхождения тел Солнечной системы. – М.–Л., 1975. – С. 228-243.
2. Шевченко В. С. Ae/Be звезды Хербига. – Ташкент: Фан, 1989. – 264 с.