ОТ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ К СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСТОТНОМУ МЕТОДУ

В. В. Прокофьева-Михайловская[1], В. В. Бусарев[2], А. Н. Рублевский[1]

[1] *Научно-исследовательский институт Крымская астрофизическая обсерватория пгт. Научный, Крым, 98409, Украина*
e-mail: `prok@crao.crimea.ua`

[2] *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ Университетский пр., 13, Москва, 119992, Россия*
e-mail: `busarev@sai.msu.ru`

После открытия и обоснования Кирхгофом метода спектрального анализа огромное количество знаний было получено астрономами об окружающих нас объектах, излучающих свет. Метод получения спектров отражения твердых небесных тел, образованных рассеянием света на их поверхностях, был разработан в начале 70-х годов XX века. Через 30 лет был создан спектрально-частотный метод (СЧМ), основанный на использовании частотного анализа спектральных данных рассеянного твердым телом света. С помощью СЧМ оцениваются размеры поверхностных образований, дающих особенности в спектрах отражения безатмосферных тел. Применение СЧМ в исследованиях двух астероидов магматических типов позволило получить принципиально новую информацию: на их поверхностях обнаружены пятна гидратированного или окисленного вещества. Пятна имеют относительно небольшие размеры. Сделано предположение, что пятна возникли в результате столкновений этих астероидов с примитивными телами, пришедшими из зоны Юпитера.

ВВЕДЕНИЕ

История развития астрофизики неразрывно связана с именами выдающихся исследователей, которых мы обязаны помнить. Развитие спектроскопии небесных объектов от Кирхгофа до наших дней создало базу для проведения многочисленных астрофизических исследований. Перед современной астрофизикой встала задача разработки новых методов исследований малых тел с целью получения максимально возможной информации об их химическом составе и свойствах их поверхностей. Такая информация необходима как для решения целого ряда космогонических проблем, связанных с эволюцией Солнечной системы, так и для решения проблемы использования минеральных ресурсов малых тел для нужд человечества. Действующие крупные наземные телескопы с диаметром зеркала порядка 4–10 м позволили бы провести астрофизические исследования малых тел с наибольшей эффективностью, однако наблюдательное время на них жестко лимитировано. Поэтому рассчитывать на получение массового объема данных с помощью крупных инструментов пока не приходится. То же можно сказать и по поводу возможности использования для решения указанной задачи телескопов космического базирования и космических миссий. Исключением является получение пробы грунта небесного тела с помощью космического аппарата, доставка его на Землю и исследования в лаборатории. Однако, это является дорогостоящей операцией и производится только в исключительных случаях. Перечисленные причины заставляют ставить вопрос о необходимости применения для систематических исследований малых тел небольших и средних по размеру телескопов, оснащенных высокочувствительной аппаратурой. Это возможно при использовании спектрально-частотного метода (СЧМ), развиваемого в НИИ КрАО совместно с МГУ.

ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Первые наблюдения спектров звезд были визуальными и производились с помощью спектроскопа. Затем для регистрации спектров была применена фотография, что дало астрономам обширный наблюдательный материал. Уильям Хёггинс, английский астроном, высоко оценил значение метода спектрального анализа для изучения небесных тел. В 1863 г. он показал, что спектры Солнца и звезд имеют много общего, начиная с 1875 г. получил многочисленные фотографические спектральные наблюдения звезд, планет и Луны. Герман Карл Фогель, немецкий астроном, выполнил спектральные наблюдения всех планет, многих комет, туманностей, новых звезд. В 1904 г. И. Гартманн обнаружил стационарную линию Ca II в переменном спектре δ Ориона (правильная интерпретация межзвездной природы линии дана А. Эддингтоном в 1926 г.). В 1909 г. Ф. Шлезингер обнаружил эффект осевого вращения на кривых лучевых скоростей затменных двойных звезд. В. Слайфер, американский астроном, в 1912 г. впервые получил лучевые скорости галактик. Э. Хаббл внес существенный вклад в развитие науки, рассчитав в 1929 г. коэффициент пропорциональности между скоростью галактик и расстоянием до них. К 1935 г. Хьюмасон получил спектры 150 галактик. В 1925 г. В. Адамс обнаружил гравитационное красное смещение в спектре Сириуса B. В 1925 г. Ц. Пейн (Гапошкина) сделала первую попытку измерения химического состава звездных атмосфер. В 1929 г. первое тщательное исследование химического состава Солнца на основании полученных Мензелом спектров вспышки выполнил Рессел. После обнаружения Дж. Гринстейном спектральных пекулярностей (1940 г.) были начаты обширные исследования химического состава звезд. Исследования излучения астрономических объектов позволило определить их химический состав, температуру и физические характеристики. Все знания о телах окружающей нас Вселенной были получены из анализа спектральных наблюдений.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА, РАССЕЯННОГО ПОВЕРХНОСТЯМИ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Звезды являются самосветящимися источниками. Другое дело – малые тела и планеты Солнечной системы, которые рассеивают и отражают свет Солнца. Исследования рассеянного малыми телами солнечного света развились и получили теоретические объяснения после изучения законов обратного когерентного рассеяния. Это направление бурно развивалось в конце прошлого века [7]. Тогда встала задача развития исследований тел Солнечной системы, что было, в частности, вызвано требованиями космической безопасности человечества. Явление когерентного обратного рассеяния света состоит в резком возрастании интенсивности света, рассеянного в малом телесном угле в направлении, противоположном направлению падения света. При падении на такую поверхность когерентной плоской волны в каждом акте упругого рассеяния изменяется направление и фаза волны. Выяснилось, что каждой волне, обходящей ряд рассеивателей, соответствует волна, обходящая тот же ряд рассеивателей в обратном направлении. И такие волны когерентны. Было показано, что эффект имеет место в случае, когда размеры рассеивающих частиц сравнимы с размерами длины волны падающего света, и поверхность тела имеет порошкообразную структуру. После открытия эффекта когерентного обратного рассеяния света довольно быстро появились публикации, объясняющие оппозиционный эффект увеличения яркости у безатмосферных тел Солнечной системы с помощью этого эффекта [4, 14, 15]. Ю. Г. Шкуратов [13], проведя анализ фотометрических данных, пришел к выводу, что оппозиционный эффект яркости (ОЭЯ) характерен почти для всех твердых поверхностей небесных тел, а амплитуда эффекта у светлых тел (астероиды E-типа и ледяные спутники планет) выше, чем у темных. Очень светлые поверхности дают узкий оппозиционный всплеск яркости с амплитудой, достигающей увеличения яркости до двух раз. В последние годы развитие нанотехнологий показало также присутствие механизма ближнего поля, который влияет на перераспределение энергии между возбужденными атомами, находящимися на расстояниях, сравнимых с длиной волны света. Эффект ближнего поля был теоретически предсказан в группе проф. О. Н. Гадомского в 1994 г. [2]. Вклад каждого из механизмов рассеяния в астрофизике рассматривается для модели реголита, которая представляет собой ансамбль кластеров, соизмеримых с длиной волны. Механизм обратного когерентного рассеяния работает наиболее эффективно в разреженных ансамблях, в то время как механизм ближнего поля, проявляет себя в более компактных структурах, сравнимых с длиной волны, и на расстояниях порядка длины волны. С рождением космической эры быстрое развитие получили методы дистанционного зондирования Земли. Под дистанционным зондированием понимается сбор информации об объекте или явлении с помощью регистрирующего прибора, не находящегося в непосредственном контакте с данным объектом или явлением. Огромное количество полученных при дистанционном зондировании Земли данных требовало развития теории рассеяния электромагнитных волн шероховатыми поверхностями. Это было необходимо для интерпретации данных зондирования различных поверхностей на основе теоретических моделей рассеяния. Наблюдение малых тел Солнечной системы также относится к методу дистанционного зондирования. Все поверхности безатмосферных тел Солнечной системы покрыты веществом, которому дано название реголит. Оно образовалось в результате так называемой “космической погоды”. Под этим термином понимается воздействие солнечного ветра, потоков энергичных частиц и бомбардировка поверхностей метеороидами. Например, предполагается, что мелкие частицы грунта образованы вследствие энергичной метеоритной бомбардировки лунной поверхности. Одностороннее оплавление частиц является результатом сверхскоростных ударов более крупных метеороидов. Первые исследования оптических свойств реголита были проведены сразу после доставки на Земли образцов лунного грунта. Верхний слой реголита представляет собой мелкоструктурный порошок, обладающий

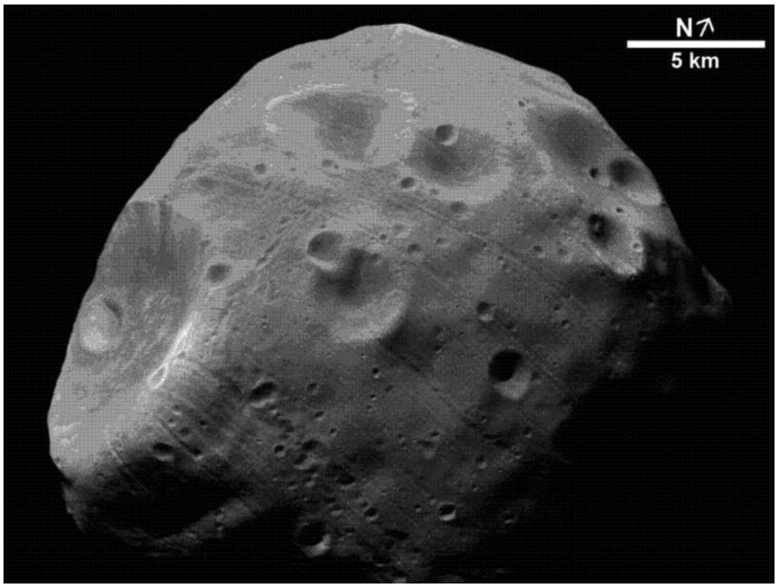

Рис. 1. Изображение спутника Марса Фобоса получено с борта космического аппарата Марс Экспресс. На поверхности спутника видны кратеры и борозды

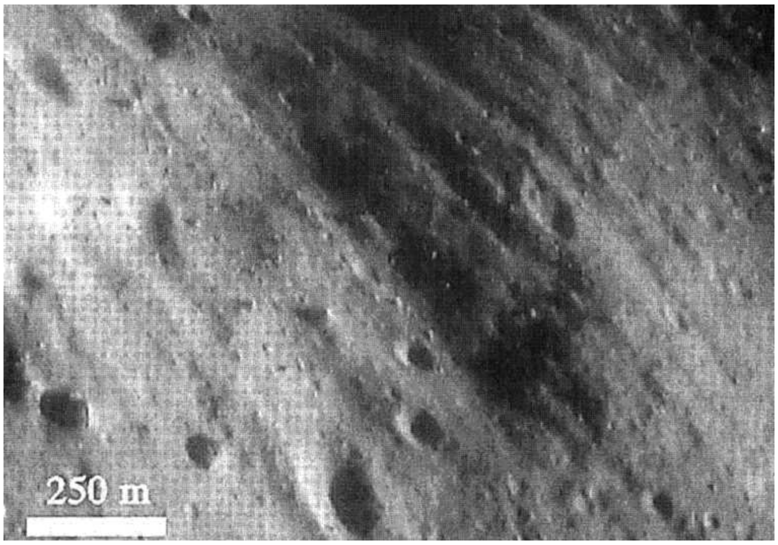

Рис. 2. Детали поверхности астероида 433 Эрос, сфотографированные космическим аппаратом NEAR с орбиты вокруг астероида. Поверхность покрыта пылевым слоем реголита. Снимок демонстрирует борозды, полученные в результате его сильной текучести

свойствами высокой текучести. Многочисленные снимки поверхностей малых тел Солнечной системы подтвердили полученные свойства реголита. На рис. 1 и 2 приведены недавно полученные космическими аппаратами снимки поверхностей спутника Марса Фобос и астроида 433 Эрос.

Изучение снимков поверхностей различных безатмосферных тел показывает, что на их поверхностях состав грунта в разных местах может быть различным. Различные фракции реголита вследствие его высокой текучести и частых соударений с другими телами располагаются в разных местах поверхностей астероидов. Это обуславливает наличие на поверхностях таких деталей, которые имеют разные законы рассеяния солнечного света. Наличие их проявляется при вращении тел в виде модуляции кривых блеска. Давно известно, что при вращении наблюдаемых с Земли тел на кривых блеска появляются детали.

Эти изменения обусловлены разным количеством отраженного и рассеянного света деталями поверхности тела в разных направлениях. Если таких деталей с разной величиной обратного рассеяния на астероиде много, то при вращении астероида количество света, направленного в сторону земного наблюдателя, становится переменным во времени.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

Спектрально-частотный метод (СЧМ) исследований поверхностей безатмосферных тел основывается на регистрации достаточно большого ряда спектров отражения твердого тела и частотном анализе полученных при обработке спектров данных о показателях цвета объекта или о величинах эквивалентных ширин различных полос поглощения. Цель метода состоит в том, чтобы получить оценки размеров расположенных на поверхности тела структурных или химико-минералогических особенностей. Метод получения спектров отражения твердых небесных тел, образованных рассеянием света на их поверхностях в видимом и ближнем ИК-диапазонах, был разработан в начале 70-х годов XX века [8]. Спектры астероида 21 Лютеция и звезды-стандарта солнечного типа получены в НИИ КрАО [9] на полуметровом менисковом телескопе МТМ-500 с помощью цифровой телевизионной аппаратуры [1].

Информация о размерах пятен на поверхностях безатмосферных тел содержится в наблюдательных данных, и вопрос состоит в том, как ее правильно извлечь. Рассмотрим вопрос анализа изменения блеска, показателя цвета или величины эквивалентной ширины исследуемой полосы. Мы предполагаем, что наличие деталей на кривых блеска и цвета обусловлено разным количеством отраженного и рассеянного света деталями поверхности в разных направлениях. При вращении астероида количество света, направленного в сторону земного наблюдателя, становится переменным во времени. Модуляция эта невелика по величине и составляет порядка нескольких сотых звездной величины. Однако современные средства наблюдений вполне уверенно регистрируют такие величины. Астрономам давно известно, что на кривых блеска астероидов наблюдаются кратковременные изменения. В книге "Астероиды" авторы Бернс и Тедеско [14] приводят формулу, по которой можно определить размер детали L, вызвавшей такое изменение:

$$L = \pi D \Delta t / P_{rot}, \tag{1}$$

где D – диаметр астероида, Δt – длительность регистрации детали на кривой блеска, P_{rot} – период вращения астероида. Авторы спектрально-частотного метода заменили величину Δt на половину величины найденного по наблюдательным данным периода p. Формула (1) при этом преобразуется в формулу:

$$L = \pi D p / 2P_{rot}. \tag{2}$$

Оценка размеров деталей на поверхностях астероидов производится по формуле (2). При этих оценках предполагается, что детали расположены в экваториальной зоне астероида. Частотный анализ фотометрических данных астероидов, полученных в НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, проводится с помощью пакетов программ, позволяющих вести поиск частот в кривых блеска любой формы. Отбеливание данных, как правило, производится в порядке уменьшения амплитуды периодических колебаний [12].

СЧМ впервые был использован для определения размеров фотометрических пятен на астероиде 1620 Географ [5, 6]. Размеры полученных пятен совпали с размерами кратеров, обнаруженных при радиолокации. Определение гидросиликатных пятен на поверхности астероида 21 Лютеция позволило сделать предположение о занесении водных соединений при бомбардировке поверхности астероида примитивными телами [9]. В качестве примера применения СЧМ приведем результаты, полученные при определении размеров цветовых и гидросиликатных пятен на поверхности астероида 4 Веста [10, 11]. Были измерены эквивалентные ширины полосы поглощения гидросиликатов, расположенной около длины волны 440 нм, где отношение сигнала к шуму достигало 140. Диапазон частот, в котором производился поиск, составлял от 4.5 до 300 c/d. Найдены два больших пятна размерами 800 км и 750 км. Они могут представлять размеры скоплений мелких пятен. Если их размер пересчитать с экваториальной зоны на широту 45°, где расположен кратер, то получаются размеры 566 км и 530 км. Размеры скоплений гидросиликатных пятен немного превосходят известный размер кратера, равный 460 км. По-видимому, они образовались во время столкновения астероида Веста с массивным примитивным телом около 1 млрд лет назад. 11 размеров лежат в пределах от 100 км до 13. Это около 70% всех размеров. Из них 9 размеров составляют менее 50 км. Это более 50% всех обнаруженных размеров пятен. Таким образом, можно сделать вывод, что преимущественно на поверхности астероида 4 Веста имеются размеры гидросиликатных пятен малых размеров от 50 до 13 км. Было сделано заключение, что гидросиликатные пятна на поверхности астероида 4 Веста являются образованиями молодыми.

Наши данные свидетельствуют, что при столкновении около 1 млрд лет назад на поверхность Весты были занесены гидросиликаты, причем они заняли площадь, большую, чем образовавшийся кратер. По-видимому, при столкновении куски прилетевшего тела разлетались в разные стороны, согласно модели касательного падения тела [17], и распространились на большую площадь. Ударное тело, по-видимому, пришло из зоны Юпитера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подчеркнем, что оценки размеров пятен на поверхностях малых тел по фотометрическим и спектральным данным были сделаны в НИИ КрАО впервые в мире. СЧМ в настоящее время разрабатывается совместно с ГАИШ МГУ. Для объяснения возможности определения размеров пятен на поверхностях астероидов и других безатмосферных тел Солнечной системы возможно использование механизма когерентного обратного рассеяния. Предполагаем, что реголит разного состава распределен на поверхностях астероидов неравномерно, образуя при освещении его солнечным светом спектральные или цветовые пятна.

[1] *Абраменко А. Н., Агапов Е. С., Анисимов В. Ф. и др.* Телевизионная астрономия / Под ред. В. Б. Никонова. 2-ое изд. – М.: Наука, 1984. – 272 с.

[2] *Гадомский О. Н., Крутицкий К. В., Гадомская И. В.* Эффект ближнего поля в оптике поверхности // Опт. и спектр. – 1998. – **84**, № 5. – С. 780–785.

[3] *Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Бочков В. В.* Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел Солнечной системы // Успехи физич. наук. – 2007. – **177**. – С. 663–675.

[4] *Длугач Ж. М., Мищенко М. И.* Влияние формы частиц реголитового слоя на характеристики оппозиционного пика яркости, обусловленного когерентным обратным рассеянием // Тезисы докладов 8-го съезда Астрономического общества и Международного симпозиума "Астрономия-2005: состояние и перспективы развития". Труды ГАИШ. – 2005. – **78**. – С. 81.

[5] *Карачкина Л. Г., Прокофьева В. В.* Об оценке размеров рельефа астероида 1620 Географ по фотометрическим наблюдениям // Проблемы небесной механики. Всерос. конф. Прогр. Тезисы. Санкт-Петербург. ИТА. МИПАО, 1997. – С. 95–97.

[6] *Карачкина Л. Г. Прокофьева В. В., Таращук В. П.* Исследование модуляции блеска астероида 1620 Географ // Астрон. вестн. – 1998. – **32**, № 4. – С. 327–339.

[7] *Кузьмин В. Л., Романов В. П.* Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах // Успехи физич. наук. – 1996. – **166**, № 3. – С. 247–278.

[8] *Маккорд Т. Б., Адамс Дж. Б.* Космохимия Луны и планет. – Труды Сов.-Амер. конф. по космохимии Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. – М.: Наука, 1975. – С. 547–573.

[9] *Прокофьева В. В., Бочков В. В., Бусарев В. В.* Исследование структуры поверхности М-астероида 21 Лютеция спектральным и частотным методами // Астрон. вестн. – 2005. – **39**, № 5. – С. 457–468.

[10] *Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н., Бочков В. В.* Размеры цветовых пятен на поверхности астероида 4 Веста // Астрон. вестник. – 2008. – **42**, № 6. – С. 540–556. (Solar System Research. – 2008. – **42**, N 6. – P. 505–521).

[11] *Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н., Бочков В. В.* Водные соединения на поверхности астероида 4 Веста // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 2008. – **104**, № 1. – С. 218–228.

[12] *Теребиж В. Ю.* Анализ временных рядов в астрофизике. – М.: Наука, 1992.

[13] *Шкуратов Ю. Г.* Исследование обратного рассеяния света твердыми поверхностями небесных тел: оппозиционный эффект яркости // Астрон. вестник. – 1994. – **28**, № 2. – С. 3–17.

[14] *Burns J. A., Tedesco E. F.* Asteroids I. / Ed. T. Gehrels. – Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. – P. 494–527.

[15] *Hapke B. W.* Coherent backscatter and the radar characteristics of outer planet satellites // Icarus. – 1990. – **88**, № 2. – P. 407–417.

[16] *Mishchenko M. I., Dlugach J. M.* Coherent backscatter and the opposition effect for E-type asteroids // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1992. – **254**. – P. 15–18.

[17] *Pierazzo E., Melosh H. J.* Hydrocode modelling of oblique impacts: The fate of the projectile // Meteorit. Planet. Sci. – 2000. – **35**. – P. 117–130.