

УДК 523.44+523.4-355+523.98

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ И ДРУГИЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ АСТЕРОИДОВ: ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ ПОДХОДЫ

© 2023 г. В. В. Бусарев^{a, b, *}

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

^bИнститут астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

*e-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 02.06.2022 г.

После доработки 12.08.2022 г.

Принята к публикации 02.09.2022 г.

Изучение физических параметров и характеристик астероидов как твердых безатмосферных небесных тел традиционно основано на тех же методах, которые применяются и при изучении большинства других небесных объектов, но имеющих определенную специфику. Основное внимание уделяется спектрофотометрии, как наиболее эффективному инструменту дистанционного изучения состава вещества, эволюции и происхождения астероидов. Но важнейшая информация об астероидах была получена и с помощью других методов наблюдений, таких как фотометрия, поляриметрия, радиометрия и радиолокация. Поэтому, кроме спектрофотометрии, в статье обсуждаются фотометрия, поляриметрия и радиометрия, которые, с одной стороны, наиболее близки в методическом плане, а с другой стороны, наметилась тенденция их комплексного использования. В связи с обнаружением у ряда астероидов сублимационно-пылевой активности и периодического образования пылевой экзосферы вблизи перигелия (см., например, Busarev и др., 2021) рассматривается методически новый подход при оценке химико-минералогического состава частиц экзосферы таких астероидов и, косвенно, — их поверхностного вещества.

Ключевые слова: астероиды, физические параметры, химико-минералогический состав вещества, фотометрия, спектрофотометрия, поляриметрия, радиометрия, сублимационная активность, наблюдательные и модельные спектры отражения активных астероидов

DOI: 10.31857/S0320930X23010012, **EDN:** HAWUFN

ВВЕДЕНИЕ

Малые размеры и удаленность астероидов при наземных наблюдениях, с одной стороны, усложняют их изучение, но с другой, — позволяют с высокой точностью определять параметры этих тел, наблюдаемых как точечные источники света относительно стандартных звезд. В системе звездных величин (при некоторых упрощающих предположениях) с помощью позиционных измерений и расчетов удается выполнить переход от оптических характеристик астероидов к их физическим параметрам и свойствам — диаметру, массе, плотности, альбедо, нерегулярности формы, спектральным свойствам, теплофизическим свойствам и др. Подобным образом, использование спектральных характеристик астероидов позволяет оценивать химико-минеральный состав их вещества и в конечном итоге — получать информацию об условиях образования не только этих тел, но и всей Солнечной системы. Важную роль в изучении состава вещества астероидов, а также их происхождения и эволюции, сыграла первая спектральная классификация этих тел Tholen

(1984), которая была выполнена по данным многополосного (восьмицветного) фотометрического обзора 589 астероидов Главного пояса в диапазоне 0.34–1.04 мкм (ECAS), в котором в качестве приемника использовался ФЭУ (Zellner и др., 1985). Эта классификация позволила впервые установить связь формы усредненных спектров отражения найденных 14 таксономических классов астероидов с их базовым химико-минералогическим составом, зависящим от физико-химических условий формирования тел (например, McCord и др., 1970; Bell и др., 1989; Gaffey и др., 1989; 2002).

Остановимся более подробно на некоторых основных результатах, полученных с помощью разных дистанционных измерений, которые используются при изучении астероидов. Следует отметить, что значение дистанционных методов изучения астероидов со временем только возрастает по причине непрерывного увеличения числа известных тел благодаря их новым обнаружениям: на сегодняшний день — более 1 млн и ста тысяч только астероидов Главного пояса (АГП)

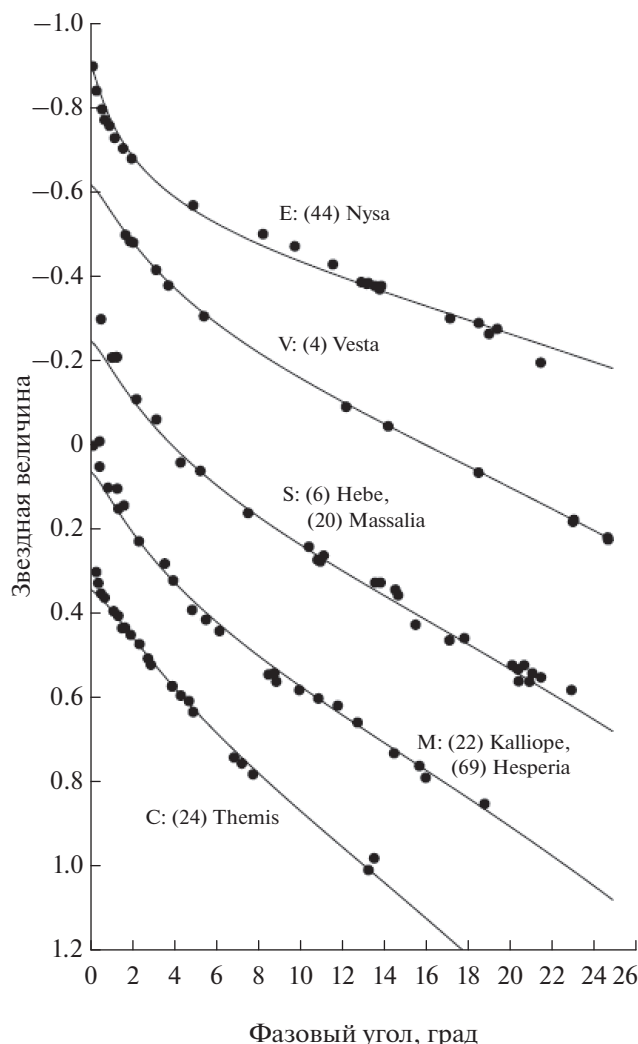


Рис. 1. Фотометрические функции АГП нескольких спектральных типов. Приведенный рисунок адаптирован из работы Muinonen и др. (2002).

(<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>). С другой стороны, проблемы астероидно-кометной опасности и неизбежное освоение в недалеком будущем космических ресурсов в околосолнечном пространстве делают рассматриваемые методы исследований малых тел еще более востребованными.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСТЕРОИДОВ ИЛИ ИХ ОЦЕНКА ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

Следует отметить, что обсуждение в данном разделе указанных вопросов частично пересекается с тем, что было уже сделано в книге «Астероидно-кометная опасность вчера-сегодня-завтра» (под ред. Шустова и Рыхловой, 2010), но только потому, что основано на общих первоисточниках

(Герелс, 1974; Bowell и др., 1989; и некоторые другие). Кроме того, здесь обсуждаемые формулы представлены в более последовательной и компактной форме, а также сопровождаются интерпретацией физического смысла и дополнено ссылками на последние публикации.

Видимая и абсолютная звездные величины

Используемая до настоящего времени формула расчета видимой звездной величины астероидов в полосе V с полуэмпирической аппроксимацией входящей в нее фотометрической функции (ФФ) имеет следующий вид (Bowell и др., 1989):

$$m_V = H_V + 5 \lg(r\Delta) - 2.5 \lg[(1 - G)\Phi_1 + G\Phi_2], \quad (1)$$

где m_V и H_V — видимая и абсолютная звездные величины астероида в полосе V и расстояния астероида от Солнца и Земли соответственно r и Δ (в а. е.). Два первых слагаемых в правой части (1) выражают точную формулу для видимой звездной величины астероида при нулевом фазовом угле. Остальная часть соотношения (1), стоящая под знаком логарифма, описывает вклад ФФ в видимую звездную величину астероида при ненулевом фазовом угле в форме достаточно сложной эмпирической комбинации функций Φ_1 и Φ_2 , зависящих от угла фазы α :

$$\Phi_i = \{\exp - A_i [\lg(\alpha/2)]^B_i\}, \quad i = 1, 2;$$

$$A_1 = 3.33, \quad A_2 = 1.87, \quad B_1 = 0.63, \quad B_2 = 1.22.$$

Как раз эта часть формулы (1) является источником погрешностей, так как основана на усредненных наблюдательных данных (полученных более 30 лет назад!) об астероидах, сближающихся с Землей (АСЗ), на очень большом интервале фазовых углов (от 0° до 120°). Как установлено из наблюдений и моделирования (см., например, Шкуратов, 1983; Helfenstein, Veverka, 1989), ФФ зависит от макро- и микроструктуры каждого тела и не является универсальной на нелинейных участках (при углах $< 7^\circ$, так называемый «опозиционный эффект», и более 40°). Кроме того, обнаружено, что особенности нелинейностей ФФ коррелируют с таксономическими типами астероидов (см., например, Muinonen и др., 2002) (рис. 1).

Можно предполагать, что специфическая минералогия каждого спектрального (таксономического) типа астероидов как бы «формирует» некоторый усредненный показатель преломления раздробленного поверхностного вещества, который вместе с микроструктурой поверхности определяет особенности отраженного (диффузно-рассеянного) солнечного света. Таким образом, для повышения точности расчетов и упрощения соотношения (1) необходим учет современных данных о ФФ АСЗ (особенно при значительных фазовых углах, недоступных при наблюдениях АГП), а также поиск более простых аналитиче-

ских приближений в диапазонах нелинейности ФФ, возможно, для каждого спектрального типа астероидов. Хотя такие попытки уже предпринимались (см., например, Petrova и др., 2007; Muinonen и др., 2009; Петрова и др., 2019), но они пока не привели к значимому результату.

Поляриметрия. Оценка геометрического альbedo по поляриметрическим данным

Прежде, чем обсудить вопрос о практическом применении поляриметрии в изучении астероидов, следует кратко напомнить о методе измерения и расчета степени линейной поляризации света, отраженного твердым безатмосферным небесным телом (P). Как известно, солнечный свет (который, в основном, является неполяризованным) отражается раздробленным поверхностным веществом астероида и при этом поляризуется (становится частично линейно поляризованным). Степень линейной поляризации света принято рассчитывать по следующей формуле (см., например, Мартынов, 1977; Belskaya и др., 2015):

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad (2)$$

где $I_{\parallel}$ и $I_{\perp}$ — интенсивности линейно поляризованного света, измеренные с помощью наземного телескопа с ПЗС-фотометром и поворотным поляризационным фильтром, который может быть ориентирован параллельно ($I_{\parallel}$) или перпендикулярно ($I_{\perp}$) к так называемой “плоскости рассеяния”, задаваемой тремя точками — геометрическими центрами фотометра, Солнца и наблюдаемого объекта. Эта характеристика наиболее чувствительна к размеру мельчайших твердых частиц (вплоть до длины волны света), покрывающих наблюдаемую сторону астероида, а также — к их форме и распределению. Используя вращение астероида и комбинируя разные дистанционные методы его изучения на разных телескопах или даже на одном, но с гибридным поляриметрическим фотометром, или спектрофотометром, можно одновременно измерять разные параметры и характеристики астероида: такие как период вращения, форма тела, распределение гранулометрического или химико-минералогического состава вещества и т. п. (см., например, Чарпан и др., 1975; Vagnuolo и др., 2015; Belskaya и др., 2015; Vornicov и др., 2018).

При лабораторном изучении линейной поляризации света (в зависимости от фазового угла $P(\alpha)$), отраженного от размельченных образцов горных пород, была установлена связь этой функции с геометрическим альbedo (долей отраженного от объекта света по сравнению с падающим) p_V в фотометрической полосе V (p_V часто называют просто “визуальным альbedo”). Но наи-

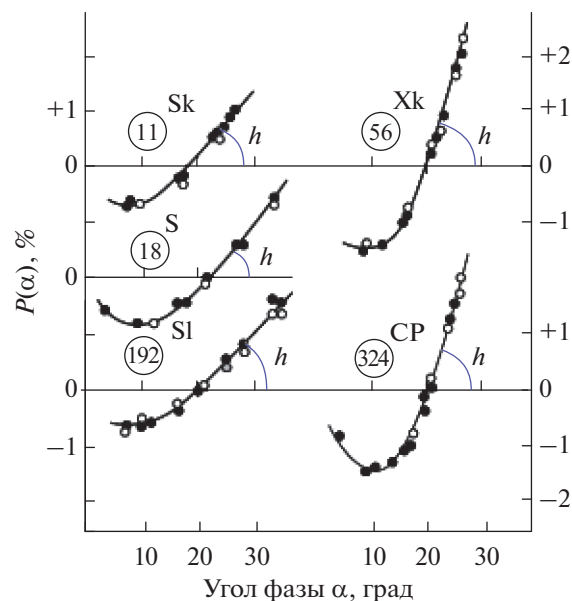


Рис. 2. Зависимость от фазового угла линейной поляризации отраженного света для нескольких астероидов (их номера обведены тонкой линией) разных спектральных типов (S, Xk и CP) и подтипов (S, Sk и SI) в области пересечения оси абсцисс и соответствующие величины угла наклона h . Рисунок адаптирован из статьи Dollfus и Zellner (1979).

более тесная корреляция была найдена между углом наклона (h) функции $P(\alpha)$ к оси абсцисс в точке их пересечения и p_V (Dollfus, Zellner, 1979) (рис. 2) (этот рисунок из указанной работы отличается от его оригинального варианта, опубликованного в книге “Астероидно-кометная опасность вчера-сегодня-завтра” (под ред. Шустова и Рыхловой, 2010), и был специально доработан для его дополнительного обсуждения). Таким образом, благодаря измерению у астероидов поляриметрической функции в зависимости от фазового угла, удалось построить некоторые средние эмпирические зависимости “ $p_V - h$ ” для астероидов каждого таксономического (спектрального) типа, что позволило независимым образом оценивать значения их среднего геометрического альbedo. На рис. 2 обозначены несколько разных спектральных типов астероидов, у которых видны различия h . В то же время такие различия отсутствуют у астероидов близких спектральных подтипов (S, Sk и SI).

Но у этого эмпирического метода есть свои “минусы”, главный из которых — необходимость проведения большого числа высокоточных измерений малых величин $P(\alpha) \sim 1-2\%$ при достаточно хороших фотометрических условиях. Еще один “минус” заключается в том, что величины p_V , определяемые по результатам фотометрии и поляриметрии одних и тех же астероидов никогда не совпадают, хотя и могут быть достаточно близкими. Такие различия, вероятно, связаны с тем,

что при определении альbedo фотометрическим и поляриметрическим методами на результаты оказывают влияние разные физические механизмы рассеяния и преломления неполяризованного и поляризованного света частицами раздробленного поверхностного вещества астероидов.

В недавнем подробном обзоре (Belskaya и др., 2015 и ссылки там же) описаны последние лабораторные и наблюдательные исследования параметров $P(\alpha)$ (h , положение и величина минимума отрицательной ветви, положение точки инверсии знака, положение и величина максимума), связь $P(\alpha)$ и оппозиционного эффекта $\Phi\Phi$ и т.п.) у разных образцов-аналогов астероидов и у самих астероидов. В то же время пока не удалось найти других универсальных эмпирических зависимостей для других поляриметрических параметров астероидов, подобных рассмотренной выше “ $p_V - h$ ”.

В настоящее время проводятся обзорные поляриметрические наблюдения больших популяций астероидов и их семейств, а также тел различных таксономических классов, результаты которых анализируются с другими видами данных, с целью поиска у астероидов общих или специфических признаков (например, Gil-Hutton, García-Migani, 2017; Masiero и др., 2022),

Диаметр и альbedo

Другая полезная теоретическая формула, полученная почти 50 лет назад (Герелс, 1974), которая связывает абсолютную звездную величину астероида H_V с его геометрическим альbedo p_V и диаметром D , не только не потеряла свой значимости, но и по-прежнему часто используется. В более удобном виде эта формула выглядит следующим образом (Bowell и др., 1989; Harris, Lagerros, 2002):

$$D = (1329/p_V^{1/2}) \times 10^{-H_V/5}. \quad (3)$$

Известная методическая трудность состоит в том, что для каждого нового астероида в одно уравнение (3) входит два неизвестных параметра — D и p_V . Можно вычислить только один из них, например D , при некоторых предположениях о p_V или наоборот. Обычно расчет H_V выполняется по формуле (1) по измеренным величинам r , Δ и m_V объекта. Кроме того, следует иметь в виду, что при определении D по формуле (3) используется еще одно упрощающее предположение — о сферической форме астероида, что в абсолютном большинстве случаев не соответствует действительности. Поэтому следует иметь в виду, что приведенные в современных базах данных значения диаметров астероидов являются, как правило, не реальными, а некоторыми эффективными величинами, которые все же более или менее удовлетворительно характеризуют эти тела при ди-

станционных измерениях. Следует еще раз подчеркнуть, что это достигается благодаря подобию фотометрических свойств астероидов и стандартных звезд как точечных источников света. В любом случае, для контроля точности расчетов D или p_V привлекаются независимые измерения — в первую очередь радиолокационные (если изучаемым телом является АСЗ), а также фотометрические, поляриметрические, полученные методом покрытия астероидами звезд и радиометрические.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АСТЕРОИДОВ С ПОМОЩЬЮ РАЗНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Фотометрия

Как уже отмечалось, фотометрические наблюдения используются практически с момента зарождения астрономии и традиционно являются наиболее простым и доступным способом исследования небесных тел. Современный этап применения фотометрии характеризуется созданием разных фотометрических систем (комбинаций последовательных фотометрических полос), ориентированных на изучение разных астрономических объектов, в зависимости от их наблюдательных параметров (см., например, Bessell, 2005 и ссылки там же). Не останавливаясь на обсуждении особенностей таких многополосных систем, а также на способах пересчета данных из одной системы в другую, отметим, что наиболее разработанной и используемой является фотометрическая система UBV Джонсона (Johnson, 1955), а в более широком диапазоне — система $UBVRI$ Джонсона–Козинса (Bessell, 1990). Более важным в обсуждаемом контексте является то, что фотометрия (преимущественно в полосе V) позволяет определять основные физические параметры астероидов, такие как размер (эффективный диаметр) и геометрическое альbedo (по измеренным звездным величинам объектов с использованием формул (1) и (3)).

В наиболее простом случае относительных измерений (с помощью наземного телескопа с ПЗС-фотометром и набором UBV или $UBVRI$ светофильтров) блеск астероида (видимую звездную величину), например, в полосе V , может быть измерен по сравнению с блеском ближайшей к астероиду по координатам стандартной (непеременной) звезды с известной видимой величиной в той же полосе. Если бы у Земли не было атмосферы, то при наблюдениях с ее поверхности видимую звездную величину астероида (m_a) можно было бы рассчитать с помощью формулы, выражающей известный закон Погсона:

$$m_a - m_{зв} = -2.5 \lg(E_a/E_{зв}), \quad (4)$$

где $m_{\text{зв}}$ — видимая звездная величина стандартной звезды, а E_a и $E_{\text{зв}}$ — освещенности, создаваемые астероидом и звездой, соответственно, на ПЗС-приемнике фотометра в абсолютных единицах (число квантов)/(с см²). При этом, как известно из квантовой механики, величина энергии кванта связана с его частотой соотношением $\varepsilon = \hbar\nu$, где $\hbar = 6.62606896(33) \times 10^{-27}$ эрг с — постоянная Планка. Но в действительности при таких относительных (или дифференциальных) измерениях необходимо учитывать спектральную прозрачность земной атмосферы $p(\lambda)$, влияние изменения воздушной массы (M), сквозь который проходит световой луч при наблюдениях астероида и звезды, а также спектральное пропускание используемого светофильтра и спектральную чувствительность ПЗС-матрицы. Существуют специальные программы (на которых здесь не будем останавливаться), с помощью которых осуществляются как сами наблюдения астероидов, так и первичная обработка наблюдательных данных. Более детально различные вопросы практической и теоретической фотометрии рассмотрены в специальных изданиях (см., например, Герелс, 1974; Миронов, 2008).

Следует подчеркнуть, что в основном с помощью фотометрии установлены такие важные факты, как неправильная форма абсолютного большинства астероидов и их вращение вокруг собственной оси с разной угловой скоростью, имеющие космогоническое значение. Как показывает моделирование (см., например, Davis и др., 2002; Bottke и др., 2015), перечисленные свойства, а также разный химико-минералогический состав и РТ-условия формирования астероидов (см., например, Gaffey, McCord, 1978; Gradie, Tedesco, 1982; Bell и др., 1989), являются главными признаками образования астероидов при интенсивном дроблении нескольких десятков их родительских тел размером с Цереру в ранней Солнечной системе.

На основе измерения, анализа и моделирования кривых блеска астероидов осуществляется их инверсия (т.е. восстановление истинной формы этих тел), а также определяется период вращения, нерегулярность формы и ориентация оси вращения астероидов (см., например, Kaasalainen, Torppa, 2001; Kaasalainen и др., 2002 и ссылки там же). Для повышения эффективности наземной фотометрии астероидов в оптическом диапазоне при моделировании и восстановлении их формы по кривой блеска в последнее время применяется фотометрия с использованием адаптивной оптики (например, Viikinkoski и др., 2017).

Но наиболее впечатляющими являются последние результаты массовой обработки данных и моделирования кривых блеска астероидов (включающих десятки тысяч объектов) по резуль-

татам их космической многополосной фотометрии, включающей ИК-диапазон. В частности, это удалось осуществить при использовании космического телескопа WISE/NEOWISE (NASA) (Durech и др., 2018 и ссылки там же). В свою очередь, получение и анализ больших объемов данных позволяют изучать физические и динамические параметры астероидов в целом, в космогоническом масштабе.

Кроме того, в течение последних двух десятилетий применяется комбинированный метод оптической фотометрии астероидов с регистрацией их кривых блеска в ИК- и/или тепловом диапазоне, что позволяет изучать такие базовые физические характеристики, как состояния вращения (спина) и формы этих тел, что особенно важно при изучении АСЗ (см., например, Rozek и др., 2019). Объем фотометрии астероидов постоянно растет, и совместная инверсия данных различных видов измерений может привести к появлению тысяч новых моделей в ближайшем будущем.

С помощью фотометрии в двух или трех фотометрических полосах могут быть определены показатели цвета и рассчитаны наклоны спектра отражения изучаемого астероида в соответствующих интервалах длин волн, которые дают возможность определить его таксономический класс. Такой упрощенный и быстрый способ оценки таксономических классов астероидов (по сравнению со спектрофотометрией) применяется уже на протяжении ~40 лет с использованием данных их массовых многополосных обзоров с целью изучения распределения тел с разным составом вещества в зависимости от гелиоцентрического расстояния (см., например, Tholen, 1984; Bell и др., 1989; Moskovitz и др., 2008; DeMeo, Carry, 2013). Решение этой проблемы имеет космогоническое значение и более подробно будет рассмотрено далее, в разделе о достижениях спектрофотометрии. Таким образом, несмотря на то, что фотометрия является наиболее простым и доступным для использования дистанционным методом изучения астероидов, с ее помощью получены важнейшие результаты.

Радиометрия

Радиометрия (РМ) — еще один независимый способ нахождения диаметра, альbedo и ряда теплофизических параметров астероидов. Как будет показано далее, в ИК-диапазоне теплофизические параметры усложняют определение диаметра и альbedo, поскольку, как уже отмечалось, зависят от структурных характеристик. Этот метод основан на измерениях и модельных расчетах температуры астероидов в тепловом (среднем) ИК-диапазоне по сравнению с абсолютно черным (или серым) телом с температурой T и излучательной способностью ε в соответствии с зако-

ном Стефана–Больцмана ($E = \varepsilon \sigma T^4$) (см., например, Lebofsky и др., 1986; Harris, Lagerros, 2002; Mainzer и др., 2015). Остановимся на РМ астероидов несколько подробнее, так как в российских научных изданиях эта тематика пока освещена недостаточно.

Полная солнечная энергия, поглощенная сферическим астероидом, выражается формулой

$$E_{\text{полн}} = \pi(D^2/4)E(1 - A), \quad (5)$$

где E — полная электромагнитная энергия Солнца, приходящая на единичную площадку (нормальную к радиусу-вектору от Солнца) на гелиоцентрическом расстоянии астероида, A — сферическое альbedo (или болометрическое альbedo Бонда) астероида, определяющее долю рассеянного солнечного излучения во всех направлениях и на всех длинах волн. Так как распределение солнечной электромагнитной энергии имеет максимум вблизи центра видимого диапазона (см., например, Уокер, 1990), а геометрическое альbedo астероидов слабо зависит от длины волны, обычно полагают, что

$$A \approx A_V = qp_V. \quad (6)$$

Кроме того, в принятой стандартной фотометрической системе (Bowell и др., 1989), где G — параметр наклона фотометрической функции (см. формулу (1)), выполняется равенство

$$q = 0.290 + 0.684G. \quad (7)$$

При наземных РМ-наблюдениях АГП в диапазоне $\sim 5\text{--}20$ мкм (который определяется наибольшими температурами нагрева этих тел солнечным излучением) возможно использование только отдельных “окон” прозрачности земной атмосферы вблизи $\sim 4.5\text{--}5.5$, $8\text{--}9.5$, $10.0\text{--}13.0$ и $18.0\text{--}20.0$ мкм (см., например, Low, Reike, 1974; Harris, Lagerros, 2002). Но, как и в фотометрическом методе, в основное расчетное уравнение (5) входят оба исходных параметра D и p_V . Поэтому в качестве первоначальных берут значения одного или обоих параметров, полученные другими методами. Далее, путем последовательных приближений (с помощью формулы (5) или ее аналога) проводится “подгонка” этих параметров к более правдоподобным величинам с помощью моделирования или использования сведений о теплофизических характеристиках и/или более точной форме объектов, например, по их кривым блеска, космическим измерениям и т.д. (см., например, Delbo и др., 2015; Mainzer и др., 2015 и ссылки там же). При РМ астероидов применяются три основные модели: “стандартная тепловая модель” (STM, Lebofsky и др., 1986; Delbo, Harris, 2002), тепловая модель “быстро вращающегося астероида” (FRM, Lebofsky, Spencer, 1989) и “тепловая модель АСЗ” (NEATM, Harris, 1998; Delbo, Harris, 2002), которые являются некоторыми предельными случая-

ми. Не углубляясь в их детали, кратко опишем общую схему определения РМ-характеристик астероидов с помощью модели STM (Lebofsky и др., 1986), как наиболее употребительной. Эта модель обычно применяется для анализа РМ-данных астероида, когда можно рассматривать астероид как очень медленно вращающееся тело, имеющее предельно низкую тепловую инерцию, а также условно принимается положение Солнца в экваториальной плоскости астероида. Тогда распределение температуры на поверхности астероида задается простой функцией углового расстояния (φ) от подсолнечной точки, где температура максимальна (T_0), т.е.

$$T(\varphi) = T_0 \cos^{1/4}(\varphi), \quad (8)$$

а величина подсолнечной температуры описывается выражением

$$T_0 = [(1 - A)E/(\eta\varepsilon\sigma)]^{1/4}, \quad (9)$$

где A — сферическое альbedo, E — поток солнечного излучения на гелиоцентрическом расстоянии астероида, η — “направляющий” (от термина “beaming” (англ.); перевод выполнен по физическому смыслу) параметр, учитывающий отклонения распределения теплового излучения астероида от Ламбертового (диффузного) из-за неровностей поверхности и при малых фазовых углах (вообще говоря, η рассматривается как нормировочный или калибровочный параметр, который позволяет корректировать и другие отклонения), ε — излучательная способность, σ — постоянная Стефана–Больцмана. При этом также считается, что температура поверхности астероида снижается до нуля на линии терминатора, а тепловое излучение на ночной стороне отсутствует. Калибровка модели STM была проведена при наблюдениях на 10 мкм астероидов 1 Церера и 2 Паллада при их небольших фазовых углах (менее 30°). Так как диаметры этих астероидов были измерены при покрытиях звезд, это дало возможность определить точное значение параметра $\eta = 0.756$ и скорректировать T_0 по формуле (8) (Lebofsky и др., 1986). Такая откалиброванная модель, названная “рафинированной”, позволила определить нижнюю границу диаметров и верхнюю границу значений геометрического альbedo у ряда астероидов Главного пояса примитивных типов, наблюдавшихся при малых фазовых углах. Более того, несмотря на простоту STM, абсолютное большинство диаметров и альbedo астероидов Главного пояса были определены по РМ-данным и с этой моделью (Delbo, Harris, 2002), в том числе у более двух тысяч астероидов, охваченных космическим обзором на ИСЗ IRAS (Infrared Astronomical Satellite, NASA) (Veeder, Tedesco, 1992). Сравнение значений диаметров астероидов, полученных при наблюдениях покрытий звезд и при использовании комбинированного метода РМ — STM, показали,

что относительные различия не превышают 20% (Harris, Lagerros, 2002), но только у тех астероидов, амплитуды кривых блеска которых не превышают 0.15^m . Поэтому нерегулярность формы астероида, его быстрое вращение и заметная тепловая инерция создают ограничения для применения STM.

В связи с этим была предложена тепловая модель сферического “быстро вращающегося астероида” (FRM, Lebofsky, Spencer, 1989), справедливая при следующих условиях: сочетание быстрого вращения с высокой тепловой инерцией вместе с простым, как и для STM, распределением температуры на поверхности, а также при положении Солнца в экваториальной плоскости астероида. В такой модели температура астероида постоянна и максимальна на всем экваторе (но оказывается ниже, чем подсолнечная температура в модели STM) и меняется только в зависимости от широты. Причем в этом случае уравнения (8) и (9) остаются по форме практически без изменений: только параметр η заменяется на постоянное число π . По результатам использования FRM был сделан вывод, что эта модель позволила для ряда АСЗ получить значения p_v , более точно соответствующие их спектральным классам (Veeder и др., 1989). Но в той же статье авторы отметили, что для новых астероидов всегда была проблема с выбором модели (STM или FRM). Поиски более универсальной модели, особенно необходимой для АСЗ, привели к модели NEATM (по аббревиатуре ее английского названия), которая на практике оказалась модифицированной моделью STM (Harris, 1998). В этой модели для каждого объекта используется информация о распределении по длинам волн теплового излучения вблизи его максимума с целью определения оптимальной величины параметра η . Если сравнивать модели STM и FRM, они предсказывают разное распределение потока теплового излучения от наблюдаемого тела, причем в модели FRM максимум оказывается на более длинных волнах (Harris, Lagerros, 2002). В то время как в модели STM параметр η принимается равным 0.756, в FRM он вообще отсутствует, как и соответствующий “направляющий” эффект (Lebofsky, Spencer, 1989). Именно поэтому в уравнении (9) модели FRM η заменяется постоянной величиной π . В то же время в NEATM η меняется как свободный параметр для того, чтобы добиться наилучшего согласия модельного распределения теплового потока и измеряемого от астероида (зависящего от тепловой инерции астероида, степени шероховатости/неровности поверхности, ориентации спин-вектора и т.п.) (Mainzer и др., 2015).

Таким образом, несмотря на то, что пока плохо известны структура, пористость и состав вещества недр астероидов, и соответственно, недостаточно известны их теплофизические характеристики,

перечисленные проблемы постепенно преодолеваются. Это достигается с помощью повышения качества измерений (отношения “сигнал/шум”), использования многополосных РМ-данных, получения кривых ИК-блеска астероидов, а также применения моделирования. Уровень точности, который подтверждает работоспособность РМ-моделей, — это различия уже не более $\sim 10\%$ между диаметрами одних и тех же астероидов, рассчитанными с применением модели NEATM, и их значениями по радиолокационным измерениям, по затмениям звезд и по результатам прямых измерений с космических аппаратов (КА) (Mainzer и др., 2011).

Поскольку, как отмечалось, наземные наблюдения в ИК-диапазоне можно проводить только в “окнах” прозрачности, лучше вообще исключить влияние земной атмосферы и осуществлять РМ-измерения с помощью космических телескопов. Наблюдения на КА IRAS — это первый космический обзор самых разных объектов в среднем ИК-диапазоне (около 12, 25, 60 и 100 мкм), включая астероиды. При выполнении этого проекта в 1983 г. были получены данные о ~ 2200 астероидах, по которым были рассчитаны диаметры и альбедо астероидов (Matson и др., 1989; Veeder, Tedesco, 1992). Хотя сравнение этих значений с результатами поляриметрии некоторых объектов привело к обнаружению систематических ошибок в IRAS-данных (Лупишко, 1998) (которые позднее были исправлены), это не помешало получить по ним важные результаты. Один из них — это бимодальность в распределении альбедо АГП (Veeder, Tedesco, 1992). Вернемся к этому интересному результату дальше.

Последующие космические миссии в ИК-диапазоне — AKARI, WISE/NEOWISE, Spitzer и Herschel (2003–2013 гг.) — значительно увеличили число малых планет с известными значениями диаметров и альбедо. В частности, очень большой объем наблюдений астероидов в миссии WISE/NEOWISE (свыше 170 тысяч) (Masiero и др., 2011) позволил по сравнению с данными, полученными на КА IRAS, значительно уточнить распределение АГП по геометрическому альбедо и подтвердить его бимодальность для астероидов ближайшей к Солнцу и центральной части Главного пояса (рис. 3) (Mainzer и др., 2011; 2015).

В 2022 г. уже началась работа в окрестности лагранжевой точки L2 крупнейшего космического ИК-телескопа им. Джеймса Уэбба (JWST) с общим диаметром сегментированного зеркала 6.5 м, представляющего собой продукт сотрудничества космических агентств из 17 стран во главе с NASA. Большие надежды возлагаются на РМ-обзор разных объектов, включая астероиды, который будет осуществлен с КА JWST в широком спектральном диапазоне (0.6–28.3 мкм). Полученные данные должны обеспечить дальнейшее

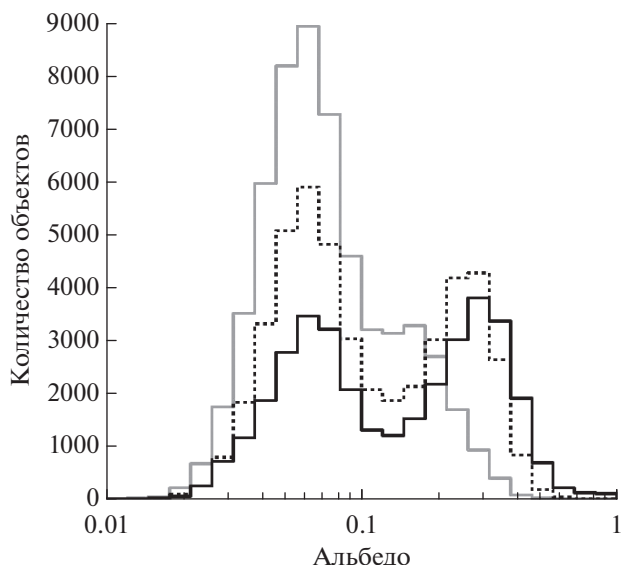


Рис. 3. Распределения геометрического альbedo АГП по данным миссии WISE/NEOWISE: для астероидов с большими полуосями орбит от 1.8 до 2.5 а. е. (черная сплошная линия), от 2.50 до 2.82 а. е. (черная точечная линия) и от 2.82 до 3.60 а. е. (серая сплошная линия). Рисунок адаптирован из работы Mainzer и др. (2015). Заметно постепенное увеличение доли АГП с низким альbedo с ростом гелиоцентрического расстояния до их абсолютного преобладания на внешней периферии Главного пояса астероидов.

определение или уточнение диаметров, альbedo и минералогии значительно большего числа астероидов, включая АСЗ.

Использование спектрофотометрии для изучения химико-минералогического состава вещества астероидов

Следует отметить преимущества использования спектрального диапазона $\sim 0.38\text{--}1.00$ мкм. Как известно, поток солнечного излучения достигает максимума вблизи центра видимого диапазона (или в фотометрической полосе J). Поэтому солнечный свет, отраженный от наблюдаемого астероида, может быть зарегистрирован при максимально высоком отношении сигнал/шум. Это обеспечивает измерение спектральных характеристик астероида с наиболее высокой точностью по сравнению с другими диапазонами, в частности с ИК-диапазоном, где с увеличением длины волны нарастает влияние посторонних структурных и теплофизических свойств вещества. Покажем далее, что видимый диапазон является наиболее благоприятным для спектрофотометрии астероидов и изучения их химико-минералогического состава.

Кратко о сути метода и его основных достижениях. Первоначальные спектрофотометрические на-

блюдения поверхности Луны и некоторых астероидов в диапазоне $0.4\text{--}1.0$ мкм вместе со звездами-аналогами Солнца продемонстрировали эффективность метода дистанционной оценки состава вещества твердых безатмосферных небесных тел, поверхность которых покрыта слоем раздробленного вещества (реголитом) (см., например, McCord, Johnson, 1970; McCord и др., 1970). Комплексные лабораторные спектральные и геохимические исследования потенциальных аналогов этих тел (раздробленных образцов метеоритов, земных минералов и других соединений) (см., например, Hunt, Salisbury, 1970a; 1970b; Adams, 1975; Gaffey, McCord, 1978; Gaffey и др., 1989) привели к пониманию того, что их спектры отражения в диапазоне $\sim 200\text{--}2500$ нм содержат прямую информацию о минералогии вещества в форме характерных полос поглощения (ПП). Было установлено, что в спектре отражения высокотемпературного по происхождению силикатного вещества, в диапазоне $350\text{--}1100$ нм, есть две самые сильные ПП: полоса переноса электронного заряда кислород-металл в УФ-диапазоне с центром у 200 нм (см., например, Loeffler и др., 1974) и комбинированная ПП пироксена и оливина с центром у ~ 1000 нм, вызываемая электронными переходами в Fe^{2+} в кристаллическом поле минералов (Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993). Напротив, в спектре отражения низкотемпературного по происхождению силикатного вещества (чаще всего гидратированного) последней ПП нет, но есть ПП интервалентного переноса заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ с центром у 700 нм. Немаловажно и то обстоятельство, что перечисленные ПП свойственны широко распространенным в природе породообразующим минералам и другим соединениям, имеют значительную ширину и влияют на форму спектров отражения таких соединений во всем рассматриваемом диапазоне. Более подробно результаты лабораторных исследований образцов-аналогов астероидов и применение их для анализа спектров отражения ряда астероидов описаны в специальном издании (Бусарев, 2011).

Вполне закономерно, что перечисленные спектральные детали стали основными признаками и в то же время различиями между спектральными типами астероидов, выделенными Tholen (1984). Следует упомянуть, что одна из предшествующих классификаций астероидов Charpan и др. (1975) была выполнена путем анализа поляриметрических, радиометрических и спектрофотометрических данных о 110 астероидах и включала всего два известных таксономических типа ("C" и "S") и один неизвестный ("U"). А еще одна похожая классификация (см., Gradie, Tedesco, 1982), хотя и основывалась на тех же наблюдательных данных, что и у Tholen (Zellner и др., 1985), но в ней были использованы только 2 пока-

зателя цвета и величина альбедо астероидов в полосе *V*. Tholen впервые применил для классификации 589 астероидов из обзора (Zellner и др., 1985) метод кластерного анализа “главных компонент” спектральных данных (семи показателей цвета в диапазоне 0.34–1.04 мкм), характеризующих минералогию поверхностного вещества астероидов (Tholen, 1984). Важно подчеркнуть, что две из указанных “компонент” определяли 95% различий между выделенными спектральными типами астероидов и соответствовали показателям цвета астероидов вблизи упомянутых наиболее сильных полос поглощения у границ используемого диапазона (Tholen, 1984). Это позволило рассчитать для выделенных типов астероидов некоторые средние спектры отражения (Tholen, Barucci, 1989) (рис. 4) и, основываясь на их сравнении со спектрами отражения образцов-аналогов, установить связь с наборами основных минералов (или метеоритов), характеризующих преобладающий состав вещества каждого из этих типов (см., например, Gaffey и др., 1989). Оказалось, что такие средние спектры отражения спектральных типов (или классов) астероидов имеют разную форму за исключением трех типов (“Е”, “М” и “Р”), спектры которых практически совпадают (см. рис. 4). Но последние удалось разделить по значениям геометрического альбедо входящих в них астероидов. Таким образом, классификация Tholen позволила выделить 14 спектральных (таксономических) классов астероидов, которые используются по настоящее время наряду с более поздними классификациями.

На рис. 4 в левой колонке размещены спектры отражения астероидов низкотемпературных по происхождению классов, за исключением двух высокотемпературных (“Е” и “М”), у которых спектры по форме практически идентичны с таковыми у “Р” класса (Gaffey и др., 1989), а в правой колонке — спектры астероидов высокотемпературных классов (Gaffey и др., 1989). Важно отметить, что классификация Tholen (1984) не только позволила установить прямую связь деталей (ПП) спектров отражения астероидов всех спектральных типов с минералогией их поверхностного вещества, но и разделить АГП на две большие группы этих тел (суперклассы) — с высокотемпературной и низкотемпературной минералогиями. Этот результат, наряду с бимодальностью распределения АГП по геометрическому альбедо, впервые обнаруженной по IRAS-данным (Veeder, Tedesco, 1992) и подтвержденной более массовыми измерениями с KA WISE (Mainzer и др., 2011), является указанием на два источника родительских тел астероидов, которые образовались в ранней Солнечной системе в существенно разных РТ-условиях. Внешний для Главного пояса астероидов источник тел мог находиться за “снеговой линией”, в зоне формирования Юпи-

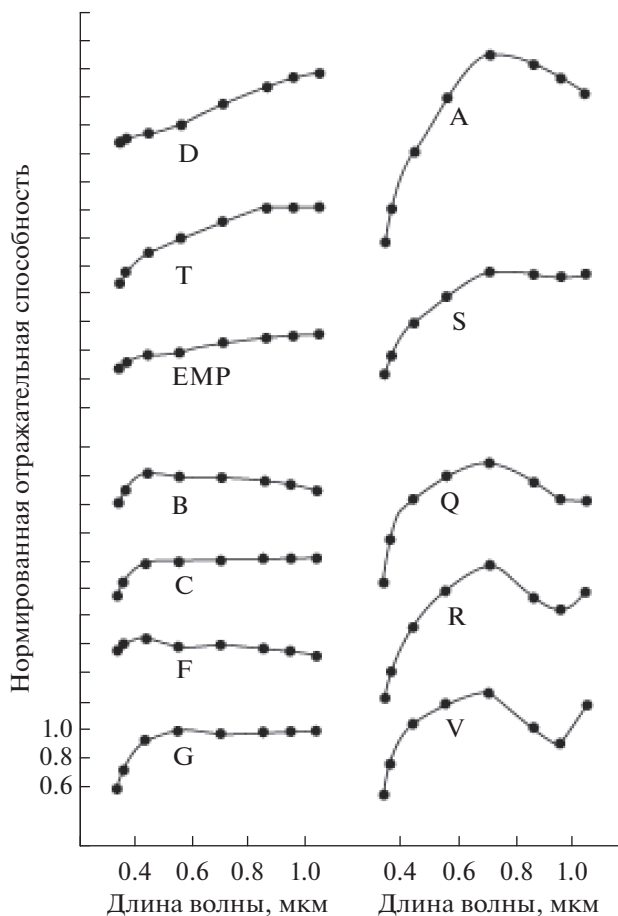


Рис. 4. Нормированные средние спектры отражения 14 разных спектральных типов астероидов классификации Tholen (1984) (обозначены буквами), которые аппроксимированы по значениям отражательной способности астероидов в светофильтрах на эффективных длинах волн, указанных точками. Вдоль вертикальной оси спектры произвольно смещены для удобства сравнения. Рисунок адаптирован из работы (Tholen, Barucci, 1989).

тера и других планет-гигантов (см., например, Busarev, 2012), а внутренний — в зоне планет земной группы, формирование которых сопровождалось сильными столкновениями протопланет и гравитационным выбросом тел меньшего размера (см., например, Petit и др., 2001; O’Brien и др., 2007). Такой сценарий репопуляции Главного пояса астероидов телами разного состава также подтверждается, вероятно, гелиоцентрическими распределениями спектральных типов астероидов классификации Tholen, представленными на рис. 5 (Bell и др., 1989).

На рис. 5 видно, что распределение наиболее многочисленных примитивных астероидов класса “С” имеет максимум на внешней границе Главного пояса астероидов и длинноволновое крыло, достигающее орбиты Юпитера, а распределения низкотемпературных астероидов классов



Рис. 5. Гелиоцентрические распределения относительного количества астероидов, входящих в разные спектральные типы согласно классификации Tholen (1984). Рисунок адаптирован из статьи (Bell и др., 1989).

“D” и “P” в том же интервале гелиоцентрических расстояний даже нарастают. Вместе с тем максимумы распределений классов “S”, “E” и “R” астероидов с высокотемпературной минералогией находятся у внутренней границы Главного пояса астероидов.

Анализ спектральных данных астероидов методом “главных компонент” также использовался в двух последующих спектральных классификациях, преемственных с классификацией Tholen. Первая из них — это классификация Bus и Binzel (2002b) (или SMASSII), проведенная по данным спектрофотометрического обзора 1447 астероидов Главного пояса (Bus, Binzel, 2002a), в котором при наблюдениях использовался спектрограф с ПЗС-матрицей в качестве приемника, работавшего примерно в том же диапазоне, что и в обзоре ECAS (Zellner и др., 1985). Благодаря этому была реализована возможность практически одновременной регистрации спектра объекта во всем используемом диапазоне. Это обеспечило улучшение качества спектра и обнаружение более слабых ПП, которые были использованы для более детальной характеристики состава вещества астероидов. В результате, в классификации SMASSII общее количество спектральных классов и подклассов астероидов возросло до 26 (Bus, Binzel, 2002b), что позволило более точно проанализировать их гелиоцентрическое распределение (напр., Mothé-Diniz и др., 2003). В следующей спектральной классификации астероидов DeMeo и др. (2009) для выделения спектральных типов астероидов были использованы те же данные из обзора SMASSII в видимом диапазоне, но с ИК-спектрами некоторых объектов в диапазоне 1.0–2.5 мкм. Но, несмотря на значительное увеличение общего спектрального диапазона (до 0.4–2.5 мкм), в этой классификации достигнут сравнительно

небольшой прогресс, как в уточнении спектральных классов, так и в изучении минералогии отдельных астероидов. Эта проблема обсуждалась нами более подробно наряду с общей характеристикой возможностей спектрофотометрии как дистанционного метода изучения астероидов (Busarev и др., 2020).

Случай сублимационно-пылевой активности астероидов. Астероиды традиционно рассматриваются как безатмосферные тела по очевидной причине их малой массы и неспособности удерживать даже разреженную атмосферу. Но примерно три десятилетия назад было обнаружено несколько так называемых “комет Главного пояса” — объектов, которые продемонстрировали кратковременную кометную активность, и поэтому были отнесены к “новому классу” попавших в Главный пояс астероидов ядрам комет (см., например, Hsieh и др., 2004; Hsieh, Jewitt, 2006). Тщательные поиски новых подобных объектов с признаками хоть какой-то активности постепенно привели к увеличению их общего числа до ~30, причем в их списке оказались и некоторые классические астероиды (см., например, Chandler и др., 2018). В связи с последним обстоятельством произошло расширение круга объектов с возможной активностью — от “комет Главного пояса” до классических астероидов. По имеющимся на сегодняшний день представлениям следующие события или механизмы могут приводить к разным проявлениям активности на астероидах (см., например, Lee, 1996; Jewitt, 2012; Jewitt, Hsieh, 2022): (1) фрагментация тел и/или выброс пылевого вещества при их взаимных столкновениях или сильных метеороидных ударах; (2) ускорение вращения небольших астероидов и их фрагментация и/или потеря пыли под действием YORP-эффекта и центробежной силы; (3) сублимация подповерхностных залежей или временных обнажений льда (после недавних ударных событий и/или при повышении поверхностных температур вблизи перигелия) на астероидах примитивных типов; (4) разрушение поверхностного вещества под влиянием перепадов температуры, вызвавшее выброс пыли или сублимацию льда; (5) электростатическая левитация мельчайшей пыли; (6) резкие изменения давления излучения (при вспышечных или эруптивных событиях на Солнце), а также их вероятные комбинации. Тем не менее рассмотрение перечисленных причин приводит к выводу об их случайном или достаточно редком характере, за исключением процесса сублимационно-пылевой активности вблизи перигелия тел, включающих замёрзшие летучие соединения, а также при воздействии на поверхность астероидов плазменных ударных волн в солнечном ветре при спорадических, но достаточно частых вспышечных и эруптивных событиях на Солнце. Обнаружение одновременной сублимаци-

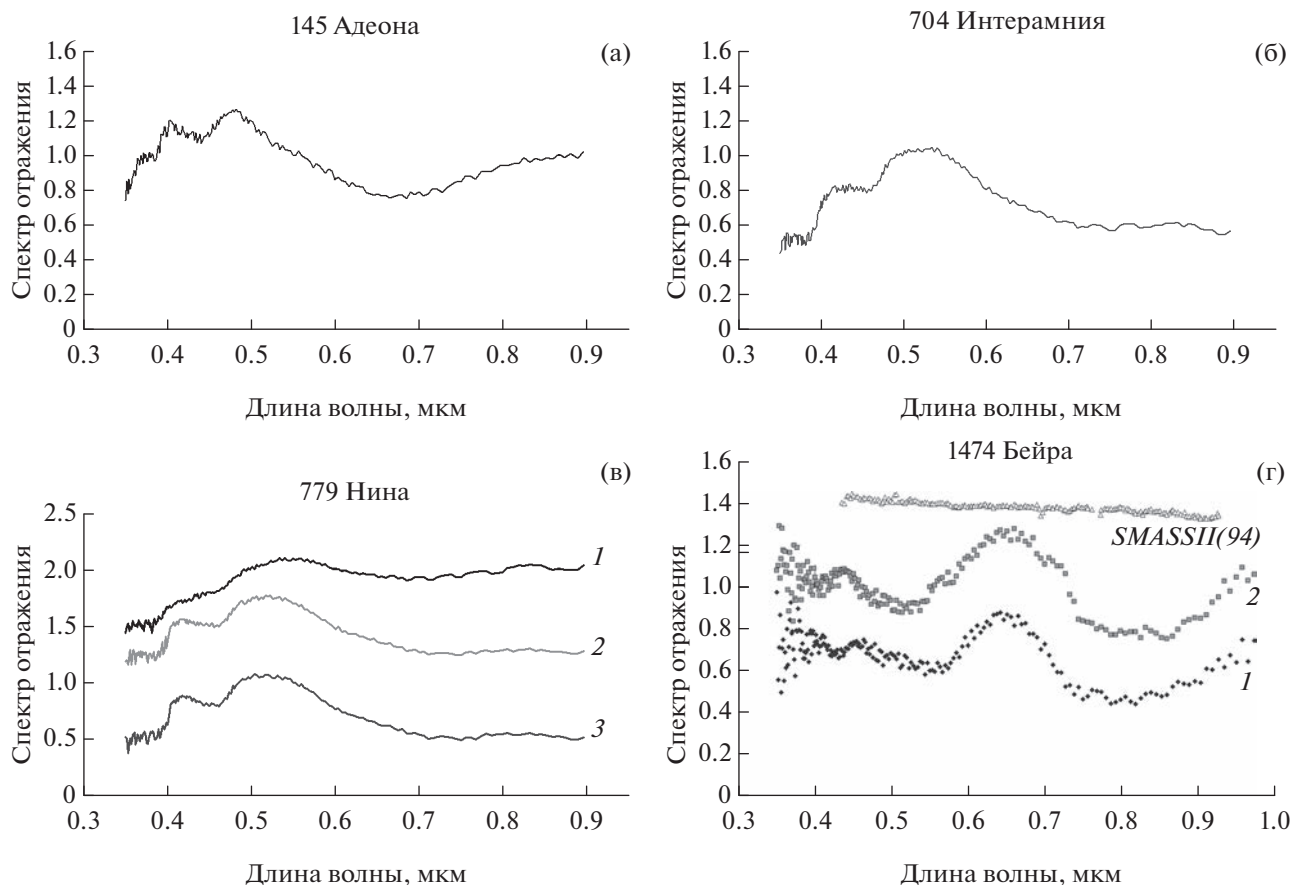


Рис. 6. Усредненные и нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения астероидов примитивных типов (а) 145 Адеоны, (б) 704 Интерамнии, (в) 779 Нины и (г) 1474 Бейры, полученные в сентябре 2012 г. при высокой солнечной активности (Бусарев и др., 2016). В период наблюдений эти астероиды находились вблизи перигелиев своих орбит. Два усредненных спектра (1 и 2) Марс-кроссера 1474 Бейры (г) были измерены в соседние ночи; для сравнения на том же рисунке приведен спектр этого астероида из базы SMASSII, полученный в 1994 г. (Bus, Binzel, 2002a).

онно-пылевой активности нескольких примитивных астероидов Главного пояса — 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и Марс-кроссера 1474 Бейры в сентябре 2012 г. (Бусарев и др., 2016), 24 Темиды, 449 Гамбургии и 704 Интерамнии в марте 2019 г. (Busarev и др., 2021), и, наконец, 145 Адеоны и 779 Нины в декабре 2021 г. (пока неопубликованные данные) — служит подтверждением такого вывода. Еще одним важным результатом является моделирование распределения внутренних температур астероидов примитивных типов Главного пояса (Schorghofer, 2008; 2016), которое показывает, что при высокой пористости и, соответственно, низкой теплопроводности поверхностного вещества астероидов примитивных типов, водяной лед в их недрах может сохраняться в течение нескольких миллиардов лет.

В качестве нового подхода в оценке состава вещества астероидов можно рассматривать изучение спектральным методом временной пылевой экзосферы, которая возникает у них под действием указанных механизмов (1), (3) и (6). В относи-

тельно короткие интервалы времени существования такой экзосферы появляется возможность определения химико-минерального состава частиц, вынесенных с поверхности наблюдаемого астероида и рассеивающих солнечный свет. Наши наблюдения показали, что признаками пылевой экзосферы у активных астероидов являются нехарактерные для их поверхностного вещества максимумы в спектрах отражения (вблизи 0.4–0.5 и/или 0.7–0.8 мкм) (Бусарев и др., 2016; Busarev и др., 2021) (см. рис. 6) или резкие изменения общего наклона спектра отражения, которые невозможно объяснить изменениями минералогии наблюдаемого поверхностного вещества этих тел при вращении.

Путем сравнения полученных спектров отражения активного астероида с модельными спектрами условного астероида, окруженного пылевой экзосферой с разным составом частиц (например, лед, силикаты, органика), который определяется по комплексному показателю преломления, можно судить о преобладающем составе вещества экзо-

сферы наблюдаемого астероида (Busarev и др., 2021). Состав пылевых частиц экзосферы в значительной мере должен определять и состав поверхностных и подповерхностных слоев астероида как источников таких частиц. Проблема обнаружения особенно актуальна для тех составляющих вещества астероида, которые не имеют диагностических ПП в видимом диапазоне. В центральной части Солнечной системы, до орбиты Юпитера включительно, наиболее обильными летучими соединениями в составе астероидов примитивных типов являются льды H_2O и CO_2 (но с учетом значительно более высокой летучести последнего преобладает первый) и органика, которые служат индикаторами происхождения и эволюции этих тел. Однако обнаружение этих соединений с помощью спектральных наблюдений проблематично. Согласно лабораторным измерениям, у водяного инея нет характеристических ПП в видимой и ближней ИК-области спектра (до 1400 нм), а у диоксида углерода в форме инея они отсутствуют и в более дальней ИК-области (см., например, Wagner и др., 1987). Попадая на поверхность астероидов (например, в при экскавации из более глубоких слоев при метеороидных ударах или при конденсации в полярных областях в виде инея), льды H_2O и CO_2 долго там оставаться не могут по причине быстрой сублимации. Вместе с этим, известная характеристическая ПП льда H_2O у 3 мкм частично перекрывается с ПП гидросиликатов и органики (см., например, Lebofsky и др., 1981; Rivkin, Emery, 2010), поэтому ее использование для идентификации временных обнажений льда H_2O на астероидах также не может дать однозначного результата. Таким образом, в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра нет надежных дистанционных способов обнаружения льдов H_2O и CO_2 на астероидах.

В то же время обнаружение водяного льда на астероидах примитивных типов возможно при появлении у них пылевой экзосферы. При сублимационно-пылевой активности таких астероидов вблизи перигелия (этот процесс может быть более интенсивным у тел со значительным эксцентриситетом орбиты и, соответственно, — при большем перепаде подсолнечных температур) газовые потоки могут выносить частицы из подповерхностных и более глубоких слоев. Как показывает численное моделирование спектров отражения условного астероида С-типа, окруженного пылевой экзосферой из агрегатов ледяных частиц субмикронного размера (при моделировании использовался показатель преломления для льда H_2O ; для H_2O и CO_2 эти показатели очень близки) (Busarev и др., 2021) (рис. 7), необычный максимум около $\sim 0.4\text{--}0.5$ мкм, обнаруженный в спектрах отражения активных астероидов 145 Адеона, 704 Интерамния и 779 Нина в сентябре 2012 г.

(Бусарев и др., 2016), с высокой вероятностью может быть результатом рассеяния света частицами водяного льда (при этом мы учитываем значительно более высокую летучесть льда CO_2 и очень быструю сублимацию частиц такого состава на гелиоцентрических расстояниях Главного пояса астероидов).

ВЫВОДЫ

В представленной статье кратко рассмотрены спектрофотометрический и другие методы дистанционного исследования астероидов, а также некоторые важнейшие результаты, полученные при их использовании. К сожалению, радиолокационный метод, по причине его большей специфики, остался вне рамок данного обсуждения.

Как следует из вышеизложенного, применение разных дистанционных методов позволяет не только получать больше информации о каждом объекте, но и последовательно ее уточнять до такого уровня, который зачастую недостижим при использовании только одного из таких методов. Важно также отметить, что в последнее время в изучении астероидов наметилась тенденция более комплексного использования возможностей всех дистанционных методов, особенно фотометрии, поляриметрии, спектрофотометрии и радиометрии, наиболее близких методически.

Естественным продолжением наземных методов наблюдений астероидов являются их космические исследования, при которых удастся избавиться от многих ограничивающих факторов, связанных с земной атмосферой. В частности, при изучении астероидов космическими методами в ИК-диапазоне уже получен очень большой объем данных, позволивших определить или уточнить значения диаметров и альбедо значительной доли известных астероидов средних и малых размеров, включая АСЗ. Также очевидно, что при использовании космической техники для изучения астероидов целесообразно расширять спектральный диапазон, как в длинноволновую, так и в коротковолновую стороны. Важно подчеркнуть, что с учетом особенностей наблюдений, измерений и моделирования данных в каждом диапазоне, полученные по каждому объекту результаты являются, с одной стороны, независимыми, а с другой — взаимодополняющими.

Значительное продвижение в изучении химико-минералогического состава вещества астероидов, а также их происхождения и эволюции, достигнута благодаря развитию спектрофотометрии и спектральных (таксономических) классификаций астероидов. Хотя детальные спектры отражения получены пока для малой доли известных астероидов при наземных наблюдениях и преимущественно в видимой части спектра, осуществление косми-

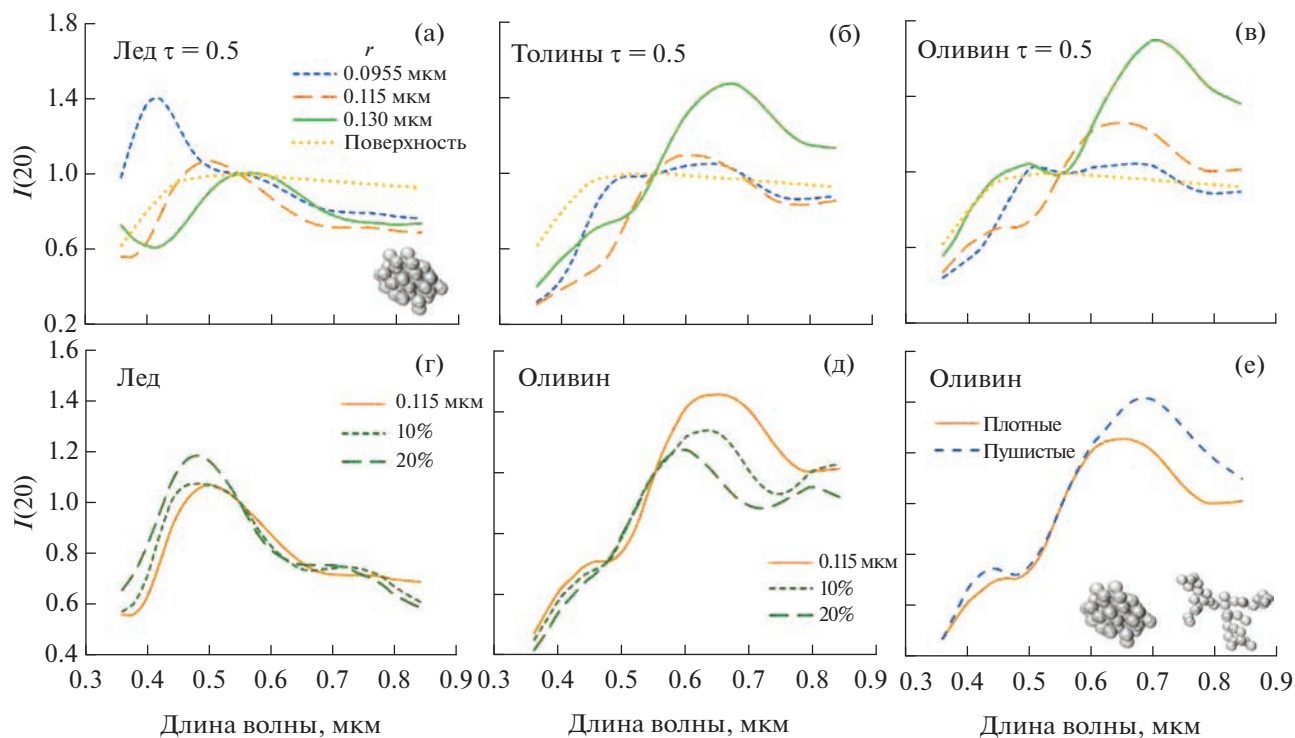


Рис. 7. На рисунках представлены модельные нормированные (на $\lambda = 0.55$ мкм) спектры обратно-рассеянной интенсивности (при фазовом угле 20°) условного астероида С-типа (его спектр отражения показан точечной желтой линией на рис. (а)–(в)), имеющего геометрическое альbedo $p_V = 0.072$ (на $\lambda = 0.55$ мкм), окруженного пылевой экзосферой. Считается, что частицы экзосферы астероида представляют собой субмикронные агрегаты еще более мелких сферических частиц (по аналогии с пылевыми частицами комет; их примеры показаны на вставках в правом нижнем углу рис. (а) и (е)), три принятых значения размеров которых указаны в правом верхнем углу рис. (а). Вариант состава вещества частиц (лед, оливин или толины) указан в левом верхнем углу каждого рисунка. На рис. (г) и (д) показаны модельные спектры отражения для случаев отклонений формы от сферической (на ± 10 и $\pm 20\%$) у частиц размером 0.115 мкм. Численное моделирование спектров выполнено Е.В. Петровой (Busarev и др., 2021).

ческих многополосных обзоров может стать оптимальным вариантом увеличения объема спектральных данных о телах среднего и меньшего размеров, в том числе АСЗ.

Обнаружение и изучение явления сублимационно-пылевой активности АГП примитивных типов вызвало рост интереса к проблеме происхождения и степени сохранности льдов в недрах классических астероидов. А последняя проблема, очевидно, связана с проблемой происхождения и эволюции самих астероидов. Необычная комбинация льдов (в основном водяного льда) и силикатных или даже металлических соединений (см., например, Rivkin и др., 2000) в составе некоторых активных астероидов указывает на сложные процессы ударного взаимодействия их родительских тел, возникших, вероятно, по разные стороны “снеговой линии” в ранней Солнечной системе. Вышеупомянутые результаты по бимодальности геометрического альbedo АГП и делении спектральных (таксономических) типов астероидов на низкотемпературные и высокотемпературные суперклассы также являются, по нашему мне-

нию, прямыми признаками двух разных источников происхождения их родительских тел.

Предложенный метод обнаружения водяного льда на астероидах примитивных типов, имеющих признаки временной пылевой экзосферы вблизи перигелия, нами уже применяется на практике (Busarev и др., 2021). Появление в спектрах отражения таких астероидов нетипичного для силикатного вещества максимума у ~ 0.4 – 0.5 мкм при прохождении перигелия является признаком выброса ледяных частиц в их экзосферу и, соответственно, — залежей водяного льда в недрах.

Автор выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы (грант РНФ 22-12-00115).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бахтин А.И. Пороодообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Изд. Казанского ун-та, 1985. 192 с.

- Бусарев В.В. Спектрофотометрия астероидов и ее приложения. LAP LAMBERT Acad. Publish. Gmb H & Co. KG, Саарбрюккен, 2011. 250 с.
- Бусарев В.В., Барабанов С.И., Пузин В.Б. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 4. С. 300–312. (Busarev V.V., Barabanov S.I., Puzin V.B. Material composition assessment and discovering sublimation activity on asteroids 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, and 1474 Beira // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. № 4. P. 281–293.)
- Герелс Т. Фотометрия астероидов // Планеты и спутники / Ред. Дольфус А. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. С. 367–430.
- Лунишко Д.Ф. Улучшенные альbedo и диаметры астероидов // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. № 2. С. 141–146. (Lupishko D.F. Improved IRAS albedos and diameters of asteroids // Sol. Syst. Res. 1998. V. 32. № 2. P. 122–127.)
- Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. 543 с.
- Мионов А.В. Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и астрофотометрии звезд. М.: Физматлит, 2008. 260 с.
- Петрова Е.В., Тишковец В.П., Нелсон Р.М., Борита М.Д. Возможности оценки свойств рыхлой поверхности на основе фазовых профилей поляризации и интенсивности отраженного света // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 3. С. 185–194. (Petrova E.V., Tishkovets V.P., Nelson R.M., Boryta M.D. Prospects for estimating the properties of a loose surface from the phase profiles of polarization and intensity of the scattered light // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 3. P. 172–180.)
- Платонов А.Н. Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка, 1976. 264 с.
- Шкуратов Ю.Г. Модель оппозиционного эффекта яркости безатмосферных космических тел // Астрон. журн. 1983. Т. 60. С. 105–108.
- Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. (ред.) Астероидно-кометная опасность вчера-сегодня-завтра. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
- Уокер Г. Астрономические наблюдения / Ред. Щеглов П.В. М.: Мир, 1990. 351 с.
- Adams J.B. Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock-forming minerals // Infrared and Raman spectroscopy of lunar and terrestrial minerals / Ed. Karr C. N.Y.: Academic Press, 1975. P. 91–116.
- Bagnulo S., Cellino A., Sterzik M. F. Linear spectropolarimetry: a new diagnostic tool for the classification and characterization of asteroids // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.: Letters. 2015. V. 446. № 1. P. L11–L15.
- Bell J.F., Davis D.R., Hartmann W.K., Gaffey M.J. Asteroids: The big picture // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 921–945.
- Belskaya I., Cellino A., Gil-Hutton R., Muinonen K., Shkuratov Y. Asteroid polarimetry // Asteroids IV / Eds Michel P. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 151–169.
- Borisov G., Devogèle M., Cellino A., Bagnulo S., Christou A., Bendjoya P., Rivet J.-P., Abe L., Vernet D., Donchev Z., Krugly Yu., Belskaya I., Bonev T., Steeghs D., Galloway D., Dhillon V., O'Brien P., Pollacco D., Poshyachinda S., Ramsay G., Thrane E., Ackley K., Rol E., Ulaczyk K., Cutter R., Dyer M. Rotational variation of the linear polarization of the asteroid (3200) Phaethon as evidence for inhomogeneity in its surface properties // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.: Letters. 2018. V. 480(1). P. L131–L135.
- Bessell M.S. *UBVRI* passbands // Publ. Astron. Soc. Pacif. 1990. V. 102. P. 1181–1199.
- Bessell M.S. Standard photometric systems // Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 2005. V. 43. P. 293–336.
- Bottke W.F., Brož M., O'Brien D.P., Campo Bagatin A., Morbidelli A., Marchi S. The collisional evolution of the main asteroid belt // Asteroids IV / Eds Michel P. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 701–724.
- Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A. Application of photometric models to asteroids // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 524–556.
- Burns R.G. Mineralogical applications of crystal field theory. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1993. 224 p.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. The observations // Icarus. 2002a. V. 158. P. 106–145.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. A feature-based taxonomy // Icarus. 2002b. V. 158. № 1. P. 146–177.
- Busarev V.V. A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites // Asteroids, Comets, Meteors (ACM). 2012. Abstract #6017, Niigata, Japan (<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1211/1211.3042.pdf>).
- Busarev V.V., Sobolev A.M., Grohovsky V.I., Kruglikov N.A. A special role of spectrophotometry in the study of asteroids and meteorite analogs // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation / Eds Votyakov S. et al. Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 43–52.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Irmambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // Icarus. 2021. V. 369. id. 114634 (18 p.).
- Chandler C.O., Curtis A.M., Mommert M., Sheppard S.S., Trujillo C.A. SAFARI: Searching asteroids for activity revealing indicators // Publ. Astron. Soc. Pacif. 2018. V. 130. id. 114502 (16 p.).
- Chapman C.R., Morrison D., Zellner B. Surface properties of asteroids: A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry // Icarus. 1975. V. 25. P. 104–130.
- Davis D.R., Durda D.D., Marzari F., Campo Bagatin A., Gil-Hutton R. Collisional evolution of small-body populations // Asteroids III / Eds Bottke W.F. Jr. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 545–558.
- Delbo M., Harris A.W. Physical properties of near-Earth asteroids from thermal infrared observations and thermal

- modeling // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2002. V. 37. P. 1929–1936.
- Delbo M., Mueller M., Emery J.P., Rozitis B., Capria M.T. Asteroid thermophysical modeling // *Asteroids IV* / Eds Michel P. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 107–128.
- DeMeo F.E., Binzel R.P., Slivan S.M., Bus S.J. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 160–180.
- DeMeo F.E., Carry B. The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys // *Icarus*. 2013. V. 226. P. 723–741.
- Dollfus A., Zellner B. Optical polarimetry of asteroids and laboratory samples // *Asteroids* / Eds Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 170–183.
- Đurech J., Hanuš J., Ali-Lagoa V. Asteroid models reconstructed from the Lowell Photometric Database and WISE data // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 617. id. A57.
- Gaffey M.J., McCord T.B. Asteroid surface materials: mineralogical characterisations from reflectance spectra // *Space Sci. Rev.* 1978. V. 21. P. 555–628.
- Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 98–127.
- Gaffey M.J., Cloutis E.A., Kelley M.S., Reed K.L. Mineralogy of asteroids // *Asteroids III* / Eds Bottke W.F. Jr et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 183–204.
- Gil-Hutton R., García-Migani E. Polarimetric survey of main-belt asteroids-VI. New results from the second epoch of the CASLEO survey // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 607. id. A103 (6 p.).
- Gradie J., Tedesco E.F. Compositional structure of the asteroid belt // *Science*. 1982. V. 216. P. 1405–1407.
- Harris A.W. A thermal model for near-Earth asteroids // *Icarus*. 1998. V. 131. P. 291–301.
- Harris F.W., Lagerros J.S.V. Asteroids in the thermal infrared // *Asteroids III* / Eds Bottke W.F. Jr et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 205–218.
- Helfenstein P., Veverka J. Physical characterization of asteroid surfaces from photometric analysis // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 557–593.
- Hsieh H.H., Jewitt D.C., Fernández Y.R. The strange case of 133P/Elst-Pizarro: A comet among the asteroids // *Astron. J.* 2004. V. 127. P. 2997–3017.
- Hsieh H.H., Jewitt D. A population of comets in the Main asteroid belt // *Science*. 2006. V. 312. 561–563.
- Hunt G.R., Salisbury J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals // *Modern Geol.* 1970a. V. 1. P. 285–300.
- Hunt G.R., Salisbury J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides // *Modern Geol.* 1970b. V. 2. P. 195–205.
- Jewitt D. The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. № 3. id. 66 (14 p.).
- Jewitt D., Hsieh H.H. The asteroid-comet continuum // *arXiv:2203.01397v1 [astro-ph.EP]* 2 Mar 2022.
- Johnson H.L. A photometric system // *Annales d'astrophysique*. 1955. V. 18. P. 292–316.
- Kaasalainen M., Torppa J. Optimization methods for asteroid lightcurve inversion. I. Shape determination // *Icarus*. 2001. V. 153. P. 24–36.
- Kaasalainen M., Torppa J., Piironen J. Models of twenty asteroids from photometric data // *Icarus*. 2002. V. 159. P. 369–395.
- Lebofsky L.A., Feierberg M.A., Tokunaga A.T., Larson H.P., Johnson J.R. The 1.7- to 4.2- μ m spectrum of asteroid 1 Ceres: Evidence for structural water in clay minerals // *Icarus*. 1981. V. 48. P. 453–459.
- Lebofsky L.A., Sykes M.V., Tedesco E.F., Veeder G.J., Matson D.L., Brown R.H., Gradie J.C., Feierberg M.A., Rudy R.J. A refined “standard” thermal model for asteroids based on observations of 1 Ceres and 2 Pallas // *Icarus*. 1986. V. 68. P. 239–251.
- Lebofsky L.A., Spencer J.R. Radiometry and thermal modeling of asteroids // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 128–147.
- Lee P. Dust Levitation on Asteroids // *Icarus*. 1996. V. 124. P. 181–194.
- Loeffler B.M., Burns R.G., Tossel J.A., Vaughan D.J., Johnson K. Charge transfer in lunar materials: Interpretation of ultraviolet-visible spectral properties of the moon // *Proc. Fifth Lunar Conf. (Suppl. 4. Geochimica et Cosmochimica Acta)*. 1974. V. 3. P. 3007–3016.
- Low F.J., Reike G.H. The instrumentation and techniques of infrared photometry // *Methods of experimental physics*. 1974. V. 12. Pt A. Astrophysics / Ed. Carleton M. Acad. Press. P. 415–462.
- Mainzer A., Grav T., Masiero J., Bauer J., Wright E., Cutri R.M., McMillan R.S., Cohen M., Ressler M., Eisenhardt P. Thermal model calibration for minor planets observed with *Wide-Field Infrared Survey Explorer*/NEOWISE // *Astrophys. J.* 2011. V. 736. id. 100 (9 p.).
- Mainzer A., Usui F., Trilling D.E. Space-based thermal infrared studies of asteroids // *Asteroids IV* / Eds Michel P. et al. Univ. Arizona Press. 2015. P. 89–106.
- Masiero J.R., Mainzer A., Grav K., Bauer J. M., Cutri R. M., Dailey J., Eisenhardt P.R.M., McMillan R.S., Spahr T.B., Skrutskie M.F., Tholen D., Walker R.G., Wright E.L., DeBaun E., Elsbury D., Gautier IV T., Gomillion S., Wilkins A. Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters // *Astrophys. J.* 2011. V. 741. id. 68 (20 p.).
- Masiero J.R., Tinyanont S., Millar-Blanchaer M.A. Asteroid polarimetric phase behavior in the near-infrared: S- and C-complex objects // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3. № 4. P. 90.
- Matson D.L., Veeder G.J., Tedesco E.F., Lebofsky L.A. The IRAS Asteroid and Comet Survey // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 269–281.
- McCord T.B., Johnson T. Lunar spectral reflectivity (0.30–2.50 microns) and implication for remote mineralogical analysis // *Science*. 1970. V. 169. P. 855–858.
- McCord T.B., Adams J.B., Johnson T.V. Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications // *Science*. 1970. V. 168. P. 1445–1447.

- Mothé-Diniz T., Carvano J.M.Á., Lazzaro D.* Distribution of taxonomic classes in the main belt of asteroids // *Icarus*. 2003. V. 162. P. 10–21.
- Moskovitz N.A., Jedicke R., Gaidos E., Willman M., Nesvorný D., Fevig R., Ivezić Ž.* The distribution of basaltic asteroids in the Main Belt // *Icarus*. 2008. V. 198. P. 77–90.
- Muñonen K., Piironen J., Shkuratov Yu.G., Ovcharenko A.* Asteroid photometric and polarimetric phase effects // *Asteroids III* / Eds Bottke W.F. Jr et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 123–138.
- Muñonen K., Nousiainen T., Lindqvist H., Muñoz O., Viiden, G.* Light scattering by Gaussian particles with internal inclusions and roughened surfaces using ray optics // *JQSRT*. 2009. V. 110. P. 1628–1639.
- O'Brien D.P., Morbidelli A., Bottke W.F.* The primordial excitation and clearing of the asteroid belt – Revisited // *Icarus*. 2007. V. 191. P. 434–452.
- Petit J.-M., Morbidelli A., Chambers J.* The primordial excitation and clearing of the asteroid belt // *Icarus*. 2001. V. 153. P. 338–347.
- Petrova E.V., Tishkovets V.P., Jockers K.* Modeling of opposition effects with ensembles of clusters: Interplay of various scattering mechanisms // *Icarus*. 2007. V. 188. P. 233–245.
- Rivkin A.S., Howell E.S., Lebofsky L.A., Clark B.E., Britt D.T.* The nature of M-class asteroids from 3- μ m observations // *Icarus*. 2000. V. 145. P. 351–368.
- Rivkin A.S., Emery J.P.* Detection of ice and organics on an asteroid surface // *Nature*. 2010. V. 464. P. 1322–1323.
- Rožek A., Lowry S.C., Rozitis B., Green S.F., Snodgrass C., Weissman P.R., Fitzsimmons A., Hicks M.D., Lawrence K.J., Duddy S.R., Wolters S.D., Roberts-Borsani G., Behrend R., Manzini F.* Physical model of near-Earth asteroid (1917) Cuyo from ground-based optical and thermal-IR observations // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 627. id. A172 (22 p.).
- Schorghofer N.* The lifetime of ice on main belt asteroids // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 697–705.
- Schorghofer N.* Predictions of depth-to-ice on asteroids based on an asynchronous model of temperature, impact stirring, and ice loss // *Icarus*. 2016. V. 276. P. 88–95.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomy: From cluster analysis to photometry // Ph. D. thesis, Univ. Arizona. 1984. 150 p.
- Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroid taxonomy // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 298–315.
- Veeder G.J., Hanner M.S., Matson D.L., Tedesco E.F., Lebofsky L.A., Tokunaga A.T.* Radiometry of near-Earth asteroids // *Astron. J.* 1989. V. 97. P. 1211–1219.
- Veeder G.J., Tedesco E.F.* Results from the IRAS Minor Planet Survey / The IRAS Minor Planet Survey. Final Report PL-TR-92-2049 / Eds Tedesco E.F. et al. Massachusetts: Phillips Laboratory, 1992. P. 107–126.
- Viikinkoski M., Hanuš J., Kaasalainen M., Marchis F., Ďurech J.* Adaptive optics and lightcurve data of asteroids: twenty shape models and information content analysis // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 607. id. A117 (14 p.).
- Wagner J.K., Hapke B.W., Wells E.N.* Atlas of reflectance spectra of terrestrial, lunar, and meteoritic powders and frosts from 92 to 1800 NM // *Icarus*. 1987. V. 69. P. 14–28.
- Zellner B., Tholen D.J., Tedesco E.F.* The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets // *Icarus*. 1985. V. 61. P. 355–416.