

О ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА АСТЕРОИДА М-ТИПА 16 ПСИХЕЯ

© 2006 г. Д. Ф. Лупишко

Научно-исследовательский институт астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Украина

Поступила в редакцию 21.02.2005 г.

В последние годы появились оценки объемной плотности крупнейшего астероида М-типа 16 Психея (1.4 и 1.8 г/см³), которые представляются слишком заниженными для астероидов этого типа. В результате интерпретации столь низкой плотности астероида с повышенным содержанием металла, каким является 16 Психея, появились оценки ее макропористости величиной в 70%. В данной работе показано, что слишком заниженные оценки плотности обусловлены в первую очередь использованием завышенного значения IRAS-диаметра астероида ($D = 264$ км, соответствующее ему IRAS-альбедо равно 0.10). Более точные поляриметрические значения альбедо (0.170) и диаметра Психеи (213 км) дают объемную плотность астероида, равную 3.3 ± 0.7 г/см³. Это значение при средней для астероидов макропористости в 30–40% соответствует составам даже с 50% содержанием металла, и тем самым снимает возникшие противоречия с радиолокационными данными, а также проблемы очень низкой плотности и нереально высокой пористости этого астероида.

ВВЕДЕНИЕ

Астероиды М-типа – “металлические” – были выделены в отдельный композиционный тип на основе их оптических свойств (альбедо, показатели цвета, поляризация, спектр), которые близки к свойствам железных метеоритов. Астероиды этого типа заметно отличаются от астероидов S-типа (силикатных) и, особенно, С-типа (углистых) более быстрым в среднем осевым вращением и более вытянутой формой (Лупишко, 1998а). Оказалось, подобные различия в форме существуют также между обыкновенными хондритами и железными метеоритами: вторые более вытянутые по сравнению с первыми. Так, например, среднее соотношение осей железного метеорита Чинге (196 образцов) составляет $3 : 2 : 1$, в то время как для обыкновенного хондрита Царев (69 образцов) – $1.7 : 1.3 : 1$ (Зоткин и др., 1987; Зоткин, Цветков, 1989). Этот факт можно легко объяснить большей плотностью (а значит, и большей прочностью) вещества железных метеоритов и М-астероидов по сравнению с обыкновенными хондритами или астероидами С- и S-типов, соответственно. В самом деле, более прочные М-астероиды (или их осколки – железные метеориты) способны выдержать без катастрофического разрушения более сильные столкновения, т.е. большее приращение углового момента и большую деформацию формы.

Более быстрое осевое вращение М-астероидов согласуется с теорией Harris (1979), согласно которой скорость вращения должна возрастать прямо пропорционально корню квадратному из средней плотности вещества астероида. В этом

случае средней скорости вращения М-астероидов $\omega = 4\text{--}4.5$ об/сут (Belskaya, Lagerkvist, 1996; Lagerkvist и др., 1998) удовлетворяет плотность $5\text{--}6$ г/см³ (Harris, 1985). Таким образом, оптические, динамические и геометрические характеристики астероидов М-типа свидетельствуют в пользу их более высокой плотности по сравнению с астероидами S- и С-типов, обусловленной, как принято считать на основании оптических и радиолокационных свойств, повышенным содержанием металла.

Астероид главного пояса 16 Психея по своим свойствам (альбедо, цвет, форма, размеры, вращение) является крупнейшим и наиболее типичным представителем М-типа. Именно поэтому он является также одним из наиболее изученных наземными методами (фотометрия, поляриметрия, спектральные и радиолокационные наблюдения М-астероидов). В частности, радиолокационное альбедо Психеи 0.31 ± 0.06 (Ostro и др., 2002), одно из самых высоких среди астероидов главного пояса, подразумевает объемную плотность астероида, равную $2.8 (+0.5, -0.6)$ г/см³, которая при пористости в 50% (см., например, Britt и др., 2002) соответствует плотности вещества, равной 5.6 г/см³ с погрешностью в пределах $\pm 20\%$ (Ostro и др., 2002). Такая плотность характерна для железосодержащих метеоритов и действительно указывает на повышенное содержание металла. Однако в последние годы получены независимые оценки массы 16 Психеи на основе анализа взаимных возмущений в движении астероидов, которые указывают на неожиданно низкую в среднем объемную плотность этого астероида.

Таблица 1. Оценки масс и плотностей астероида М-типа 16 Психея

Масса $\times 10^{-11} M_{\odot}$	Плотность, г/см ³	Метод определения	Источник
0.87 ± 0.26	1.8 ± 0.6	динамический	Viateau, 2000
1.49 ± 0.31	$(3.1 \pm 0.6)^*$	динамический	Кузнецов, 2001
0.68 ± 0.14	1.4 ± 0.3	динамический	Кочетова, 2003
0.83 ± 0.18	1.7 ± 0.4	среднее взвешенное	—

* Кузнецов не определял плотность; это значение получается из определенной им массы при значении диаметра Психея $D = 264$ км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ И ПЛОТНОСТИ АСТЕРОИДА ПСИХЕЯ

Первым таким указанием явилось определение, сделанное Viateau (2000). Используя IRAS-диаметр Психея $D = 264$ км (Matson, 1986) он получил оценку объемной плотности астероида, равную 1.8 ± 0.6 г/см³. Такая плотность представляется слишком низкой для астероидов М-типа. В связи с этим Viateau сам отмечает, что в определении массы астероида Психея возможно присутствует какая-то систематическая ошибка, связанная с наблюдательной селекцией.

Кузнецов (2001) на основе анализа взаимных возмущений 28 крупнейших ($D > 200$ км) астероидов главного пояса определил их массы и получил для Психея величину, равную $(1.49 \pm 0.31) \times 10^{-11} M_{\odot}$. При том же IRAS-диаметре Психея $D = 264$ км это дает оценку объемной плотности астероида, равную 3.1 ± 0.6 г/см³. Эта оценка вполне сравнима с плотностью, оцененной из радиолокационных данных (см. выше), и не противоречит повышенному содержанию металла в веществе астероида.

Казалось бы, что величина плотности, определенная Viateau (2000), действительно оказалась почему-то заниженной. Однако совсем недавно Кочетова (2003) получила наиболее точное определение массы Психея и ее результат (см. табл. 1) оказался еще более экстремальным и неожиданным, чем у Viateau: объемная плотность астероида Психея равна 1.4 ± 0.3 г/см³.

Несмотря на то что все эти определения массы сделаны так называемым динамическим методом, у каждого из этих трех авторов была своя методика определения (разные возмущающие астероиды и их количество, разные критерии отбора этих астероидов и др.), поэтому их вполне можно считать независимыми. Это дает возможность определить среднее взвешенное значение массы астероида Психея по трем описанным определениям (вес каждого взят пропорциональным $1/\sigma^2$). Оно оказалось равным $(0.83 \pm 0.18) \times 10^{-11} M_{\odot}$ и при упомянутом выше диаметре астероида дает оценку

его объемной плотности, равную 1.7 ± 0.4 г/см³ (табл. 1). Такое значение плотности является более низким, чем даже плотность S-астероидов (силикатных), и примерно соответствует плотностям некоторых низкоальбедных астероидов C-, P- и F-типов (Britt и др., 2002; Hilton, 2002), аналогами вещества которых являются углистые хондриты с плотностями вещества 2.0–2.5 г/см³.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

В обзоре (Britt и др., 2002) низкую оценку объемной плотности астероида Психея связывают либо с очень высокой пористостью вещества астероида, либо с ошибочно принятой минералогией. Так ли это и в чем может состоять возможная причина столь низкой средней плотности М-астероида 16 Психея? Рассмотрим следующие возможности:

а) содержание металла в астероидах М-типа не такое высокое, как принято считать на основе оптических и радиолокационных данных;

б) используемый при определении средней плотности вещества IRAS-диаметр астероида $D = 264$ км может быть отягощен значительной ошибкой в сторону завышения;

в) большая пористость вещества астероида.

Анализируя первую возможность следует напомнить, что 25 лет назад широко распространенной была точка зрения, что М-астероиды – это железо-никелевые ядра бывших более крупных дифференцированных тел, потерявших в результате столкновений свои силикатные оболочки, и аналогами их вещества являются железные метеориты. Этому во многом способствовала публикация Dollfus и др. (1979), в которой авторы утверждали, что поверхности астероидов М-типа не могут быть силикатными, а покрыты металлическими фрагментами размерами 20–50 мкм. Заметив в этой работе возможную некорректность методологического характера, Д. Лупишко и И. Бельская в Астрономической обсерватории ХГУ осуществили программу фотометрических и поляриметрических наблюдений крупнейших астероидов М-типа и провели аналогичные фотометрические и поляриметрические лабораторные измерения 22 образцов различного состава, но примерно одинаковой структуры. Среди этих образцов было 13 метеоритов различных типов (включая два железных), пять силикатов (энстатит, оливин, бронзит, гиперстен и геденбергит) и четыре металла техногенного происхождения (железо, никель, алюминий и свинец). На основе анализа полученных фазовых кривых блеска и поляризации М-, S- и C-астероидов и лабораторных образцов с привлечением спектральных данных был сделан вывод о том, что поверхности крупнейших М-астероидов (а именно: 16, 21, 22, 55, 69 и 110) не являются чис-

то металлическими, а содержат значительную силикатную компоненту (Lupishko, Belskaya, 1989). Этот вывод получил подтверждение в 1990-х годах в результате обнаружения так называемых “wet” астероидов М-типа (т.е. “мокрых, влажных”), содержащих интенсивные полосы поглощения H_2O гидратированных силикатов вблизи 3 мкм (Rivkin и др., 1995; 1997). Кроме того, результаты спектральных наблюдений М-астероидов показали также, что в их спектрах присутствуют и полосы поглощения силикатов в видимой области спектра (Busarev, 1998). Таким образом, все эти данные не согласуются с упомянутой выше точкой зрения о чисто металлической природе М-астероидов. Однако о повышенном содержании металла в веществе этих астероидов говорят как спектральные и радиолокационные данные, так и особенности их формы и вращения, о чем говорилось во Введении. Как отмечалось в работе (Lupishko, Belskaya, 1989), наиболее вероятными аналогами их вещества могут быть железо-каменные метеориты и энстатитовые хондриты типа E4. Заметим, что по сообщению Heinz (1988) исследованный им высокожелезистый метеорит (50% Fe) содержит магнезиальные силикаты энстатит и форстерит. По мнению этого автора, его можно отнести к энстатитовым хондритам, расширив интервал их классификационных параметров. Удельный вес этого метеорита, который вполне может быть аналогом вещества М-астероидов, составляет 4.63 г/см^3 .

В отношении второй возможности следует отметить, что в обоих определениях плотности (табл. 1) авторы использовали диаметр Психеи $D = 264 \text{ км}$ из первой версии IRAS-данных (Mason, 1986). В 1992 г. опубликована вторая версия более точных IRAS-альbedo и диаметров астероидов (Tedesco, Veeder, 1992). Это самый большой массив относительно однородных данных об альbedo и диаметрах астероидов, который содержит параметры примерно для 2000 астероидов и поэтому широко используется для самых различных целей: классификации астероидов по типам, выделения и изучения физических семейств астероидов, интерпретации радиолокационных наблюдений, определения плотностей астероидов и др. В то же время, как было показано автором данной статьи (Лупишко, 1998б), IRAS-альbedo и диаметры астероидов версии 1992 г. отягощены значительными случайными и систематическими ошибками. По сравнению с поляриметрическими альbedo астероидов, которые оказались наиболее близкими к альbedo, полученным из покрытий звезд астероидами, и имеют относительные погрешности не более 20% (Lupishko, Mohamed, 1996), погрешности IRAS-альbedo в несколько раз больше (более подробно см. в Лупишко, 1998б). Одним из источников этих погрешностей является несоответствие используемой “стандартной”

Таблица 2. Альbedo и диаметры 16 Психеи по данным ИСЗ IRAS и поляриметрическим данным и соответствующие им значения объемной плотности

Источник данных	Альbedo p_V	Диаметр, км	Плотность, г/см^3
IRAS, 1986 г.	0.10	264	1.7 ± 0.4
IRAS, 1992 г.	0.120	253	2.0 ± 0.4
поляриметрия	0.170	213	3.3 ± 0.7

теплофизической модели астероида тепловым свойствам реальных астероидов разных типов и, в первую очередь, астероидам М-типа, плотность и теплопроводность которых может отличаться существенно от предусмотренных стандартной моделью.

В табл. 2 приведены значения геометрического альbedo (полоса V) и диаметров Психеи по данным ИСЗ IRAS (Infrared Astronomical Satellite) (обе версии) и по поляриметрическим данным, а также посчитанные по ним значения объемной плотности астероида для среднего взвешенного значения его массы $(0.83 \pm 0.18) \times 10^{-11} M_\odot$.

Прежде всего, данные этой таблицы показывают, что IRAS-диаметр Психеи по данным версии 1992 г. дает несколько большую плотность, чем диаметр из версии IRAS-данных 1986 г., который использовали и Viateau (2000), и Кочетова (2003). И поскольку это более поздняя переработанная версия IRAS-данных, то, вероятно, новое значение диаметра (253 км вместо 264 км) дает более реалистическое значение объемной плотности Психеи. Однако, как упоминалось выше, поляриметрические оценки альbedo астероидов и их диаметров существенно более точны по сравнению с аналогичными IRAS-данными (Лупишко, 1998б). Поляриметрическое значение альbedo Психеи составляет $p_V = 0.170$ (Lupishko, Mohamed, 1996) и оно совпадает с имеющимися оценками среднего значения альbedo для астероидов М-типа 0.170 ± 0.048 (Belskaya, Lagerkvist, 1996) и 0.17 ± 0.04 (Шевченко, Лупишко, 1998). Этот факт является еще одним доводом в пользу более точного значения поляриметрического альbedo Психеи $p_V = 0.170$, которое вместе с абсолютной звездной величиной астероида $H = 5.90$ (Лупишко и др., 1982; Эфемериды малых планет, 2004 г.) дает значение его диаметра $D = 213 \text{ км}$ и соответствующее значение объемной плотности 3.3 г/см^3 (см. табл. 2). Отметим здесь, что абсолютная звездная величина $H = 5.90$ является как раз средней между полюсным и экваториальными аспектами астероида (т.е. между максимальным и минимальным поперечными сечениями астероида, см. Лупишко и др., 1982) и поэтому полученное значение $D = 213 \text{ км}$ соответствует именно среднему диаметру равновеликого астероида. Полученное значение плотно-

сти 3.3 г/см^3 с учетом возможной пористости вещества астероидов в 30–50% (Britt и др., 2002) вполне соответствует составам, обогащенным металлом, типа железо-каменные метеориты. Таким образом, заниженные значения объемной плотности астероида Психея, полученные Viateau (2000) и Кочетовой (2003), объясняются прежде всего завышенным значением диаметра астероида, которое они использовали.

В отношении пористости вещества астероидов стоит остановиться на следующем. Как отмечено в обзоре Britt и др. (2002), имеющиеся оценки объемной плотности астероидов разных типов показывают, что для большинства из них она существенно ниже плотности соответствующих им метеоритных аналогов. А это означает, что астероиды имеют значительную пористость вещества. Что касается пористости вещества поверхностного слоя, т.е. микропористости, то по оценкам указанных авторов значения этого параметра для астероидов заключены в пределах от 0% (2 Паллада) до 70–75% (16 Психея). Однако, поскольку речь идет об объемной плотности вещества астероида, здесь важно знать не столько микропористость поверхностного слоя, которая действительно может быть довольно высокой из-за малого размера частиц реголита и слабой гравитации, сколько макропористость, которая включает в себя пустоты и трещины внутри тела (Britt и др., 2002). Последние могут сохраняться с момента формирования астероида, а также образовываться в результате взаимных столкновений тел. Величина макропористости будет зависеть от внутренней структуры астероида (или это монолитный прочный фрагмент, или же это объект типа “rubble pile”, т.е. слабо консолидированная груда камней, удерживающихся вместе только силами гравитации). Как и для микропористости, оценки ее заключены почти в тех же пределах: от 0% у крупнейших астероидов 1 Церера, 2 Паллада и 4 Веста до ~70% у 16 Психея (Britt и др., 2002). Таким образом, Психея оказалась наиболее пористым астероидом среди 19 объектов разных типов, для которых получены соответствующие оценки, причем, с нереально высокой пористостью. На основе этих данных авторы цитируемой работы заключают, что Психея скорее всего является объектом типа “rubble pile”, т.е. образованным в результате катастрофического разрушения более крупного тела с последующей реаккумуляцией фрагментов, которые удерживаются вместе только силой гравитационного притяжения.

Обратим внимание на то, что приведенные выше оценки пористости Психея получены Britt и др. (2002), основываясь на плотности вещества, равной 2.0 г/см^3 , которая получается, если использовать массу Психея, определенную Viateau (2000), а диаметр – из второй версии IRAS-данных, $D = 253 \text{ км}$. Но если использовать более точ-

ное определение массы Психея Кочетовой (2003), которое почти на 30% оказалось меньшим, чем у Viateau (2000), то тогда пористость вещества, необходимая для согласования данных, окажется еще более высокой.

Однако не трудно подсчитать, что при полученной в данной работе объемной плотности Психея 3.3 г/см^3 (см. табл. 2) даже для 50% содержания металла в веществе (подобно упомянутому выше высокожелезистому метеориту с плотностью 4.63 г/см^3 (Heinz, 1988)) требуется микропористость величиной в 40%, а макропористость (предполагая, что пористость железо-каменных метеоритов в среднем такая же, как и остальных типов метеоритов, т.е. около 10% (Britt и др., 2002)) – величиной в 30%. Эта величина соответствует средней пористости для астероидов и представляется вполне допустимой для Психея, по сравнению с 70% пористостью, определенной в работе (Britt и др., 2002), основываясь на заниженной объемной плотности. Таким образом, значение объемной плотности Психея $3.3 \pm 0.7 \text{ г/см}^3$, полученное на основе средневзвешенного значения ее массы и поляриметрического диаметра, соответствует средней для астероидов макропористости даже при 50% содержании металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ имеющихся данных показывает, что аномально низкие значения объемной плотности астероида М-типа 16 Психея, полученные Viateau (2000) и Кочетовой (2003), объясняются, прежде всего, завышенным значением диаметра астероида, которое они использовали. Более точные поляриметрические значения альбедо (0.170) и диаметра (213 км) снимают возникшие противоречия с радиолокационными данными, а также сложности с очень низкой плотностью и нереально высокой пористостью астероида, и не противоречат возможному повышенному содержанию металла в веществе этого астероида.

На примере астероида 16 Психея видно к каким последствиям может привести неточное знание таких фундаментальных характеристик астероида, как его альбедо и размер (последний, как известно, определяется на основе альбедо и абсолютной звездной величины астероида). Это, прежде всего, неправильные данные о плотности и пористости вещества, которые влекут за собой неправильные представления о таксономии и составе вещества астероида, его внутренней структуре, происхождении и пр. Вот почему задача дальнейшего уточнения IRAS-данных об альбедо и размерах астероидов по-прежнему остается весьма актуальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зоткин И.Т., Медведев Р.В., Горбачев Ф.Ф. Прочностные характеристики метеорита Царев // Метеоритика. 1987. Вып. 46. С. 86–93.
- Зоткин И.Т., Цветков В.И. Рассеяние и характер залегания метеорита Чинге // Метеоритика. 1989. Вып. 48. С. 3–9.
- Кочетова О.М. Применение новых критериев отбора возмущаемых малых планет для определения масс возмущающих малых планет динамическим способом // Сообщ. ИПА РАН. СПб. 2003. № 165. 42 с.
- Кузнецов В.Б. Определение масс 108 астероидов // Сообщ. ИПА РАН. СПб. 2001. № 138. 28 с.
- Луишико Д.Ф. Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных. Докт. дисс., Харьков. 1998а. 259 с.
- Луишико Д.Ф. Улучшенные IRAS-альбедо и диаметры астероидов // Астрон. вестн. 1998б. Т. 32. № 2. С. 141–146.
- Луишико Д.Ф., Бельская И.Н., Тупиева Ф.А., Чернова Г.П. UVV-фотометрия астероидов М-типа 16 Психея и 22 Каллиопа // Астрон. вестн. 1982. Т. 16. № 2. С. 101–108.
- Шевченко В.Г., Луишико Д.Ф. Оптические свойства астероидов по данным фотометрии // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. № 3. С. 250–263.
- Эфемериды малых планет на 2004 год / Ред. Батраков Ю.В., Кочетова О.М., Скрипниченко В.И. и др. СПб: ИПА РАН, 2004. 570 с.
- Belskaya I.N., Lagerkvist C.-I. Physical properties of M class asteroids // Planet. and Space Sci. 1996. V. 44. № 8. P. 783–794.
- Britt D.T., Yeomans D., Housen K., Consolmagno G. Asteroid density, porosity, and structure // Asteroids III / Eds Bottke W.F.Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 485–500.
- Busarev V.V. Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // Icarus. 1998. V. 131. № 1. P. 32–40.
- Dollfus A., Mandeville J.C., Duseaux M. The nature of the M-type asteroids from optical polarimetry // Icarus. 1979. V. 37. № 1. P. 124–132.
- Harris A. Asteroid rotation. II. A theory for the collisional evolution of rotation rates // Icarus. 1979. V. 40. № 1. P. 145–153.
- Harris A. Asteroid lightcurve studies // Proc. Int. Conf. “Asteroids, Comets, Meteors, II” 3–6 June 1985, Uppsala / Eds Lagerkvist C.-I., Linblad B.A., Lundstedt H., Rickman H. Sweden: Uppsala Univ., 1985. P. 35–44.
- Heinz K. Phasen des System Eisen-Silizium in einem Meteoriten // Radex Rdsch. 1988. № 1. S. 536–547.
- Hilton J.L. Asteroid masses and densities // Asteroids III / Eds Bottke W.F.Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 103–112.
- Lagerkvist C.-I., Belskaya I.N., Erikson A., et al. Physical studies of asteroids. XXXIII. The spin rate of M-type asteroids // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1998. V. 131. P. 55–62.
- Lupishko D.F., Belskaya I.N. On the surface composition of the M-type asteroids // Icarus. 1989. V. 78. № 2. P. 395–401.
- Lupishko D.F., Mohamed R.A. A new calibration of the polarimetric albedo scale of asteroids // Icarus. 1996. V. 119. № 1. P. 209–213.
- Matson D.L. (Ed.). IRAS asteroid and comet survey. 1986. Preprint version № 1, JPL D–3698, Pasadena, CA.
- Ostro S.J., Hudson R.S., Benner L.A.M., et al. Asteroid radar astronomy // Asteroids III / Eds Bottke W.F.Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 151–168.
- 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. № 1. P. 90–100.
- 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. № 3. P. 972–973.
- Tedesco E.F., Veeder G.J. IMPS albedos and diameters catalog (FP 102)/IRAS Minor Planet Survey / Eds Tedesco E.F., Veeder G.J., Flower J.W., Chillemi J.R. Hanscom Air Force Base, MA (USA). 1992. P. 243–285 (Philips Lab. Final Report PL-TR–92–2049).
- Viateau B. Mass and density of asteroids 16 Psyche and 121 Hermione // Astron. and Astrophys. 2000. V. 354. P. 725–731.