

Где могут быть скрыты родительские тела астероидов?

В. В. Бусарев

Государственный астрономический ин-т им. П. К. Штернберга, Москва,
Россия

E-mail: busarev@sai.msu.ru

На основе анализа наблюдательных данных и следствий из современных космогонических моделей делается вывод о том, что фрагменты родительских тел астероидов могут быть покрыты слоем нетипичного для них раздробленного вещества и в некоторых случаях недоступны для дистанционных исследований. Выдвигается гипотеза о постааккреционном периоде пылевой эволюции астероидов.

Where May Be Hidden Asteroid Parent Bodies? Busarev V. V. (*Sternberg State Astronomical Institute, Moscow, Russian Federation*). From analysis of observational data and results of contemporary cosmogonic models a conclusion is made that fragments of asteroid parent bodies may be covered with a layer of atypical shattered matter and inaccessible in some cases for remote investigations. A hypothesis is propounded on a postaccretionary period of asteroid dust evolution.

Введение

Как следует из известных космогонических моделей [Шмидт, 1954; Сафронов, 1969; Wetherill, 1989], на гелиоцентрических расстояниях, соответствующих современному главному поясу астероидов, аккумуляция протопланетных тел была остановлена гравитационным влиянием растущего зародыша Юпитера. «Опережающий» рост ядра Юпитера был обеспечен повышенной плотностью твердого вещества в зоне его формирования. Вероятно, именно в этот период происходил интенсивный вынос водяного пара из более горячих внутренних областей солнечной системы на гелиоцентрические расстояния около 5 а. е., в узкую кольцевую зону с $\Delta R \approx 0,4$ а. е., перекрывающейся с зоной роста Юпитера [Stevenson, Lunine, 1988]. По P - T -условиям в протосолнечной туманности [напр., Макалкин, Дорофеева, 1996] здесь же происходила конденсация и замерзание не только H_2O , но и NH_3 , и CH_4 . По достижении ядром Юпитера массы более 5 масс Земли (менее чем за 10^7 лет после коллапса околосолнечного протопланетного облака) [Сафронов, 1969; Pollak et al., 1996; Рускол, Сафронов, 1998] процесс аккреции на него планетезималей сменился процессом их выброса далеко за пределы юпитерианской зоны, в том числе - в пояс астероидов. Выбрасываемые тела приобретали высокие хаотические скорости - до нескольких километров в секунду и более [Сафронов, 1969]. Вследствие высокой начальной плотности вещества в юпитерианской зоне размеры и массы планетезималей там могли быть в десятки раз больше, чем в зоне астероидов [Сафронов, 1969]. Поэтому вторгающиеся в пояс астероидов огромные тела юпитерианской зоны (ТЮЗ) не только сильно возмущали относительное движение родительских тел астероидов, но и выметали их далеко за пределы пояса. Наряду с указанным процессом удаления твердого вещества из пояса астероидов, вероятно, действовали и

другие. Были также предложены механизмы гравитационного выброса Юпитером астероидов из резонансных зон и выноса осколков астероидных тел (меньше нескольких десятков метров) турбулентными потоками газа [Сафронов, Зиглина, 1991; Рускол, Сафронов, 1998]. Все это, вероятно, в конечном итоге привело к резкому снижению средней плотности вещества в зоне астероидов (примерно в 10^3 раз по сравнению с ее возможной первоначальной величиной после аккреции протопланетного облака) [Weidenschilling, 1977; Сафронов, Зиглина, 1991].

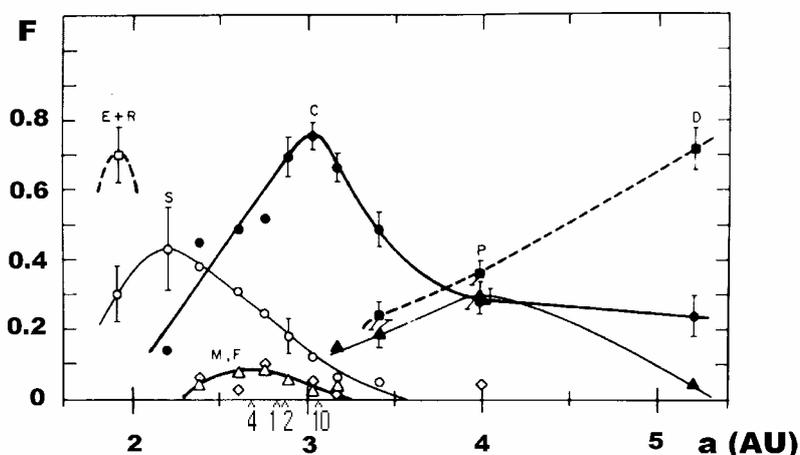
До перечисленных катастрофических событий уже могли закончиться процессы нагревания недр и формирования металлических или силикатно-металлических ядер родительских тел астероидов. В настоящее время почти не вызывает сомнений, что основным источником тепла для разогрева недр родительских тел астероидов и их последующей дифференциации служил распад короткоживущего изотопа ^{26}Al . Прямым доказательством этого является обнаружение его «дочернего» изотопа, ^{26}Mg , в дифференцированных метеоритах [Srinivasan et al., 1999, Nyquist et al., 2001]. В результате спутниковых и других измерений было также показано, что ^{26}Al широко распространен во Вселенной как остаток взрывов новых и сверхновых звезд [Mahoney et al., 1984; McSween et al., 2003]. Высокая эффективность ^{26}Al в разогреве малых планетных тел (до 1000 км в диаметре) объясняется не только его обилием в протопланетной газо-пылевой среде, но и близостью его периода полураспада (0,72 млн. лет) или нескольких таких периодов к возрасту формирования родительских тел астероидов (около 3-4 млн. лет) [Cameron, 2002]. По причине такого совпадения, вероятно, стала возможной дифференциация вещества в недрах родительских тел астероидов и образование ядер. Достаточно короткое время их аккумуляции до крупных размеров (порядка 1000 км) обеспечило им такой уровень концентрации ^{26}Al в веществе, что выделение тепла в их недрах могло превосходить его потерю за счет теплопроводности и привело к его накоплению [Козловская, Маева 1985; Grimm, McSween, 1993].

Наблюдательные данные и некоторые противоречия

В современной спектральной классификации астероидов главного пояса насчитывается 14 основных спектральных типов, определяемых по геометрическому альбедо (в полосе V) и форме спектров отражения в диапазоне 0,3-1,1 мкм [Tholen, Barucci, 1989]. Когда были построены распределения астероидов этих спектральных типов по гелиоцентрическим расстояниям, то оказалось, что максимумы распределений астероидов 8 наиболее многочисленных типов образуют регулярную последовательность: (E + R), S, M, F, C, P и D (Рис. 1) [Gradie, Tedesco, 1982]. Это означает, что с увеличением гелиоцентрических расстояний состав астероидов [например, Gaffey et al., 1989] в среднем меняется от высокотемпературного (силикатно-металлического) до низкотемпературного (филлосиликатного, с включением связанной воды). Однако такая закономерность прослеживается только по

максимумам распределений, а сами распределения значительно перекрываются по гелиоцентрическим расстояниям, что, вероятно, является указанием на частичное перемешивание вещества соседних кольцевых зон пояса астероидов в ходе его эволюции. Характерное расстояние изменения состава вещества в поясе астероидов оказывается порядка 1 а. е. [Ruzmaikina et al, 1989], что весьма мало по масштабам солнечной системы. То есть от внутреннего края пояса астероидов к его внешнему краю наблюдается резкий переход от тел, сложенных высокотемпературными силикатами (типа 4 Весты) до астероидов с примитивным составом (С, Р, и D), не имеющих признаков теплового метаморфизма вещества. Как ранее уже отмечалось [Binzel, 1989], эта особенность структуры пояса астероидов может быть связана с ограниченным действием механизмов разогрева вещества планетезималей на раннем этапе их эволюции. Еще одной особенностью рассматриваемой структуры пояса астероидов по составу вещества является то, что высокотемпературные типы (Е, R, S, М и F) (Рис. 1) тяготеют к внутренней границе пояса астероидов, а низкотемпературные типы – к внешней. Интересно также отметить, что распределение астероидов наиболее многочисленного типа С, имеющих наиболее примитивный состав вещества, является всеохватывающим для пояса астероидов.

Рис. 1.

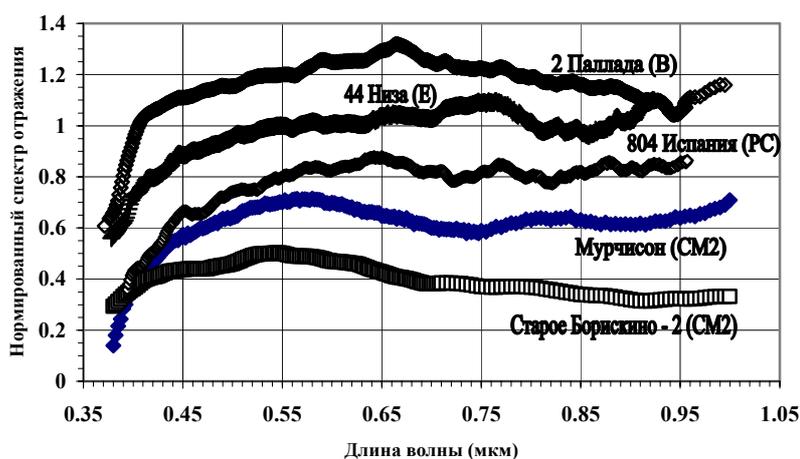


Можно полагать, что наблюдаемая в настоящее время структура пояса астероидов по составу вещества (Рис. 1) [Gradie, Tedesco, 1982] отражает изменение составов соответствующих родительских тел астероидов, точнее - их недр. Очевидно, после завершения внутреннего теплового метаморфизма недр родительских тел астероидов были частично вскрыты в период их столкновительной эволюции. Аккумуляция родительских тел астероидов могла произойти наиболее быстро вблизи внутренней границы пояса астероидов. По-видимому, это объясняется близостью последней к зоне формирования планет земной группы, где в период эволюции протопланетного диска в условиях турбулентного переноса вещества в сторону Солнца могло происходить накопление вещества перед границей испарения силикатов и металлов (на гелиоцентрических расстояниях $> 0,4$ а.

е.) [Макалкин, Дорофеева, 1996]. Как следствие, повышенная плотность вещества в зоне планет земной группы, вероятно, способствовала ускоренному росту здесь планетезималей и аккреции допланетных тел. Соответственно, такие планетезимали могли «захватить» наибольшее количество ^{26}Al и нагрев их недр мог быть наиболее сильным. Однако указанная модель пока не дает ответа на вопрос, могла ли такая зона повышенной плотности вещества простираться до гелиоцентрических расстояний порядка 2,0 - 2,5 а. е., соответствующих внутренней границе и середине современного пояса астероидов.

По-видимому, астероиды 1 Цереру ($D \approx 940$ км), 2 Палладу ($D \approx 520$ км) и 4 Весту ($D \approx 540$ км) можно рассматривать как нераздробленные родительские тела астероидов. Прямое вращение Цереры и Паллады, вероятно, свидетельствует о том, что им удалось избежать катастрофических столкновений с другими телами за весь период существования. Эти крупнейшие астероиды находятся у внешнего края наиболее плотной части пояса астероидов и весьма близки по своему гелиоцентрическому положению к 4 Весте, имеющей предельную для астероидов степень дифференциации вещества [Gaffey et al., 1989]. Можно предполагать, что недра Цереры и Паллады также нагревались при распаде ^{26}Al , испытали дифференциацию и сложены высокотемпературными силикатами. Но как объяснить то, что их поверхность покрыта веществом хондритового или даже углисто-хондритового состава, включающего гидросиликаты типа серпентина или хлорита? Именно так можно интерпретировать спектры отражения Цереры [напр., Vilas, Gaffey, 1989] и Паллады (Рис. 2), похожие на лабораторные спектры отражения углистых хондритов и земных гидратированных силикатов [Busarev, Taran, 2002; King, Clark, 1989].

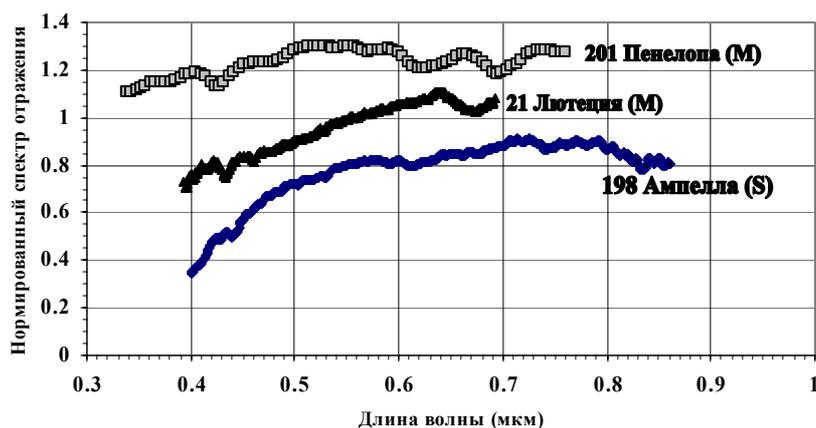
Рис. 2.



Другой ряд противоречивых наблюдательных данных представляют собой спектры отражения гидратированных астероидов E-, M- и S-типов (Рис. 3). В соответствии с их таксономической классификацией [Tholen, Barucci, 1989] по альбедо и общей форме спектров отражения в видимом диапазоне, они могут быть сложены высокотемпературными силикатами (пироксенами,

оливинами и др.) или даже включать металлы, как астероиды М- и S-типов. В тоже время, на их спектрах отражения имеются слабые (но широкие) полосы поглощения у 0,43 и 0,60-0,90 мкм, характерные для гидратированных силикатов (Рис. 2 и 3). Кроме того, в поверхностном веществе примерно четверти всех известных астероидов М-типа установлено наличие воды в связанном состоянии по характерной полосе поглощения у 3,0 мкм в спектрах отражения [Rivkin et al., 2000]. Необычные спектральные характеристики гидратированных астероидов E-, M- и S-типов можно рассматривать как результат присутствия на их поверхности смеси разнородных материалов. Такая комбинация материалов могла возникнуть на поверхности астероидов вследствие переноса в пояс астероидов примитивного вещества ТЮЗ в период их выброса Юпитером. Причем гидратированные силикаты могли быть перенесены на астероиды только при низких скоростях столкновений тел (менее 100 м/с) или при распространении пыли.

Рис. 3.



Гипотеза о постаккреционном периоде пылевой эволюции астероидов

В период массового проникновения в пояс астероидов гигантских ТЮЗ (с размерами до нескольких тысяч километров), выбрасываемых Юпитером на этапе «опережающего» роста, аккумуляция родительских тел астероидов была остановлена [Сафронов, 1969]. Для того чтобы ТЮЗ могли достичь внутренней границы пояса астероидов, они должны были иметь скорости по отношению к астероидным телам не менее 3 км/с [Рускол, Сафронов, 1998]. Учитывая дисперсию скоростей в современном поясе астероидов -около 5 км/с, - можно предполагать, что скорости ТЮЗ в среднем были порядка этой величины и более. Исходя из общего состава вещества, вошедшего в Юпитер [Pollak et al., 1996], ТЮЗ могли состоять примерно из равных пропорций водяного льда, силикатной пыли и органики (CHON). Очевидно, что высокоскоростные столкновения таких крупных ледяных тел с

неоднородным составом и низкой механической прочностью с родительскими телами астероидов, имеющих в основном силикатный состав, должны были приводить к крайне высокой степени фрагментации первых. По-видимому, выметание родительских тел астероидов было возможно только при их центральных или около-центральных столкновениях с ТЮЗ. Поэтому вывод об основной роли таких столкновений в удалении вещества из пояса астероидов [Сафронов, Зиглина, 1991] кажется не вполне обоснованным. Оценка эффективности указанного процесса [Витязев и др., 1990] показала, что ТЮЗ могли поглотить и вынести из зоны астероидов только более половины первоначального количества тел. Указанная оценка может рассматриваться как подтверждение того, что другие процессы здесь были более эффективны. В качестве важного вспомогательного механизма удаления вещества из зоны астероидов можно рассматривать именно фрагментацию вещества при столкновениях ТЮЗ с родительскими телами астероидов и при взаимных столкновениях астероидов между собой. В результате чего могли образовываться многочисленные пылевые облака, оседающие длительное время на все ближайшие небесные тела. В массовом же количестве пыль и более крупные частицы могли удаляться из пояса астероидов при турбулентном переносе газа [Сафронов, Зиглина, 1991], независимо от направления его движения – к Солнцу или от него. На этом основании может быть сформулирована гипотеза о постагрегационной пылевой эволюции астероидов: массовые столкновения ТЮЗ и родительских тел астероидов, а также последующие взаимные столкновения астероидов между собой привели к значительной фрагментации сталкивающихся тел и образованию огромного количества пыли, которая могла длительное время оседать на Солнце, планеты и астероиды. Хотя эта гипотеза подтверждается приведенными наблюдательными данными, очевидно, она нуждается в обосновании на большем наблюдательном материале.

Несколько неожиданным следствием из этой гипотезы является то, что сохранившиеся родительские тела астероидов (или их фрагменты) могут быть покрыты не только раздробленным собственным веществом, но и пылью нетипичного для них состава. Состав такой пыли мог полностью сохраниться при ее медленном оседании на поверхности астероидов в слабых гравитационных полях. Поскольку, как отмечалось, ТЮЗ по массам и размерам в десятки раз могли превосходить родительские тела астероидов, а их вещество было значительно более примитивным (со значительной долей водяного льда, органики, и даже гидросиликатов) и непрочным, то они, вероятно, были основным источником пыли, возникшей в поясе астероидов в период столкновительной эволюции. После сублимации ледяной компоненты мелких фрагментов ТЮЗ на меньших гелиоцентрических расстояниях в их составе могли остаться только силикаты и тугоплавкая органика. Возможно, что по составу вещества такие пылинки были подобны углистым хондритам.

Таким образом, слоеный состав Цереры, Паллады или фрагментов других родительских тел астероидов, мог, например, возникнуть в результате оседания на их поверхность пылевого вещества углисто-хондритового

состава, привнесенного в пояс астероидов планетезималями из зоны роста Юпитера при столкновениях с родительскими телами астероидов. Подобный сценарий «доставки» вещества примитивного состава на тела силикатного и силикатно-металлического состава уже был предложен при интерпретации спектров отражения гидратированных астероидов М- и S- типов [Бусарев, 2002; Busarev, Taran, 2002]. Предположение о слоеной структуре Цереры, Паллады и других астероидов мы не можем проверить, пользуясь одними дистанционными методами. Оптические методы исследований несут информацию только о первых миллиметрах верхнего слоя вещества астероидов, а радиолокационные (на длинах волн 3,5 и 13,0 см) – о его слое толщиной порядка нескольких десятков сантиметров или метра [Magri et al., 1999]. Возможно, ответы на поставленные вопросы дадут в будущем прямые измерения с космических аппаратов, направленных к наиболее интересным малым планетам.

Ссылки:

Бусарев В. В. Гидратированные силикаты на астероидах М-, S- и E- типов как возможные следы столкновений с телами из зоны роста Юпитера // Астрон. вестн. 2002. Т. 36. N1. С. 39-47.

Витязев А. В., Г. В. Печерникова, В. С. Сафронов. Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция. – М.: Наука, 1990. 296 С.

Козловская С. В., С. В. Маева. Термическая история родительских тел метеоритов // Астрон. вестн. 1985. Т. 19, №3. С. 211-223.

Макалкин А. Б., В. А. Дорофеева. Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца. II. Результаты расчета моделей // Астрон. вестн. 1996. Т. 30. N6. С. 496-513.

Рускол Е. Л., В. С. Сафронов. Рост Юпитера как важный фактор формирования планетной системы // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. N4. С. 291-300.

Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет/ М: Наука, 1969. С. 179-189.

Сафронов В. С., И. Н. Зиглина. Происхождение пояса астероидов // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. N2. С. 190-199.

Шмидт О. Ю. О происхождении астероидов // Докл. АН СССР. 1954. Т. 96. С. 449-552.

Binzel R. P. An overview of the asteroids // Asteroids II / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 3-18.

Busarev V. V., M. N. Taran. On the spectral similarity of carbonaceous chondrites and some hydrated and oxidized asteroids // Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002). 2002. Technical University Berlin, ESA-SP-500, Berlin. P. 933-936.

Cameron A. G. W. Birth of a solar system // Nature 2002. V. 418. P. 924-925.

Gaffey M. J., J. F. Bell, D. P. Cruikshank. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // Asteroids II / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 98-127.

- Gradie J., E. Tedesco.* Compositional structure of the asteroid belt // *Science*. 1982. V. 216. P. 1405-1407.
- Grimm R. E., H. Y. McSween, Jr.* Heliocentric zoning of the asteroid belt by aluminum-26 heating // *Science* 1993. V. 259. P. 653-655.
- King T. V. V., R. N. Clark.* Spectral characteristics of chlorites and Mg-serpentine using high-resolution reflectance spectroscopy // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. No. B10. P. 13,997-14,008.
- Mahoney W. A., J. C. Ling, Wm. A. Wheaton et al.* HEAO 3 discovery of ^{26}Al in the interstellar medium // *Astrophys. J.* 1984. V. 286. P. 578-585.
- McSween Jr. H. Y., A. Ghosh, R. E. Grimm et al.* Thermal Evolution Models of Asteroids // *Asteroids III* / Eds Bottke W. et al. Tucson: Univ. of Arizona Press, 2003. P. 559-571.
- Nyquist L. E., Y. Reese, H. Wiesmann et al.* Live ^{53}Mn and ^{26}Al in an unique cumulate eucrite with very calcic feldspar (An-98) // *Meteoritics & Planet. Sci.* 2001. V. 36. A151-A152.
- Magri C., S. J. Ostro, K. D. Rosema et al.* Mainbelt asteroids: Results of Arecibo and Goldstone radar observations of 37 objects during 1980-1995 // *Icarus* 1999. V. 140. P. 379-407
- Pollak J. B., O. Hubickyj, P. Bodenheimer et al.* Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas // *Icarus* 1996. V. 124. P. 62-85.
- Rivkin A. S., E. S. Howell, L. A. Lebofsky et al.* The nature of M-class asteroids from 3- μm observations // *Icarus*. 2000. V. 145. P. 351-368.
- Ruzmaikina T. V., V. S. Safronov, S. J. Weidenschilling.* Radial mixing of material in the asteroidal zone // *Asteroids II* / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 681-700.
- Safronov V. S.* On the origin of asteroids // *Asteroids* / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 975-991.
- Srinivasan G., J. N. Goswami, N. Bhandari.* ^{26}Al in eucrite Piplia Kalan: Plausible heat source and formation chronology // *Science* 1999. V. 284. Iss. 5418. P. 1348-1350.
- Stevenson D. J., J. I. Lunine.* Rapid formation of Jupiter by diffuse redistribution of water vapor in the solar nebula // *Icarus* 1988. V. 75, No. 1. P. 146-155.
- Tholen D. J., M. A. Barucci.* Asteroid taxonomy // *Asteroids II* / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 298-315.
- Vilas F., M. J. Gaffey.* Phyllosilicate absorption features in main-belt and outer-belt asteroid reflectance spectra // *Science* 1989. V. 246. P. 790-792.
- Weidenschilling S. J.* The distribution of mass in the planetary system and the solar nebula // *Astrophys. Space Sci.* 1977. V. 51. P. 152-158.
- Wetherill G. W.* Origin of the asteroid belt // *Asteroids II* / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 661-680.

Подписи к рисункам:

Рис. 1. Распределение спектральных типов астероидов в соответствии с [Gracie, Tedesco, 1982], на котором отмечено положение самых крупных астероидов 1 Цереры, 2 Паллады, 4 Весты и 10 Гигеи.

Рис. 2. Нормированные спектры отражения (на 0,55 мкм) астероидов 2 Паллады (В-тип), 44 Низы (Е-тип), 804 Испании (РС-тип), а также углистых хондритов Мурчисон и Старое Борискино из [Busarev, Taran, 2002].

Рис. 3. Нормированные спектры отражения (на 0,55 мкм) 201 Пенелопы (М-тип), 21 Лютеции (М-тип) и 198 Амеллы (S-тип).