

УДК 523.44

Вклад Крымской астрофизической обсерватории в поляриметрию астероидов

Д.Ф. Лупишко

НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 24 сентября 2008 г.

Ключевые слова: астероиды, поляриметрия, спектральная зависимость поляризации, вариации параметров поляризации

1 Введение

В 1972–1975 гг. в Аризонском университете (США) осуществлена программа поляриметрических наблюдений астероидов и получены фазовые кривые поляризации около сотни астероидов в одной, реже – в В и V полосах (Зельнер, Грейди, 1976). Параметры фазовых кривых были использованы для определения альбедо и диаметров астероидов по эмпирическим зависимостям “наклон-альбедо” и “ P_{\min} -альбедо”. Физическая же интерпретация данных наблюдений оставалась крайне ограниченной и сводилась к сравнению с аналогичными данными для Луны и Меркурия и заключению о наличии реголита на поверхностях астероидов. Трудности в интерпретации результатов поляриметрии явились одной из причин того, что поляриметрические наблюдения астероидов после этой программы фактически прекратились.

На этом фоне сотрудничество в поляриметрии астероидов, начатое в 1983 г. между АО ХГУ и КрАО, представляется сейчас очень важным и своевременным. В нем участвовали: со стороны КрАО Ефимов Ю.С. и Шаховской Н.М., а со стороны АО ХГУ – Бельская И.Н. и Лупишко Д.Ф.. Наблюдения проводились на 1,25-м рефлекторе АЗТ-11 и пятицветном UBVR-I-поляриметре, и основной целью их было изучение спектральной зависимости параметров поляризации астероидов, поскольку ранее такие исследования не проводились.

За прошедшее время наблюдениями было охвачено около 4-х десятков астероидов. Полученные спектральные зависимости отрицательной поляризации $P_{\min}(\lambda)$ астероидов различных типов показали (Бельская и др., 1987; Лупишко, 1998), что их характер определяется типом астероида и имеет качественное сходство с аналогичными зависимостями для соответствующих метеоритных аналогов вещества: для низкоальбедных астероидов $|P_{\min}|$ уменьшается в красную область спектра (подобно тому, как это имеет место для углистых хондритов), а для средне- и высокоальбедных астероидов S, M, V и E-типов возрастает с длиной волны подобно тому, как это имеет место для каменных метеоритов и основных порообразующих силикатов. Этот результат является важным как с точки зрения генетической связи астероидов и метеоритов, так и с точки зрения классификации астероидов по типам. Более детально в течение нескольких оппозиций исследовался ряд астероидов главного пояса и сближающихся с Землей, и были получены важные результаты на уровне новых эффектов.

2 Крупнейший астероид главного пояса 1 – Церера

Пятицветная поляриметрия, проведенная нами в 1986 г. (Бельская и др., 1987), выявила у Цереры особенность, которая не наблюдается у других астероидов, а именно: монотонное возрастание позиционного угла плоскости отрицательной поляризации с длиной волны (рис. 1). Величина его составила 2° на интервале UBVR длин волн (0.37–0.83 мкм) при точности измерений позиционного угла от 0.7° (полоса U) до $0.2\text{--}0.4^\circ$ в остальных полосах. Других поляризметрических UBVR-наблюдений Цереры то время еще не было, однако были высокоточные UVB-наблюдения, выполненные Зельнером и Грейди (1976) в сентябре 1974 г., которые повторяли спектральный ход угла в 1986 г. По нашей просьбе А. Челлино (Туринская обсерватория, Италия) 13 и 14 января 1990 г. провел наблюдения Цереры на аналогичном UBVR-поляриметре. Несмотря на довольно большие погрешности измерения средние за две соседние ночи результаты наблюдений показывают такое же возрастание угла с длиной волны.

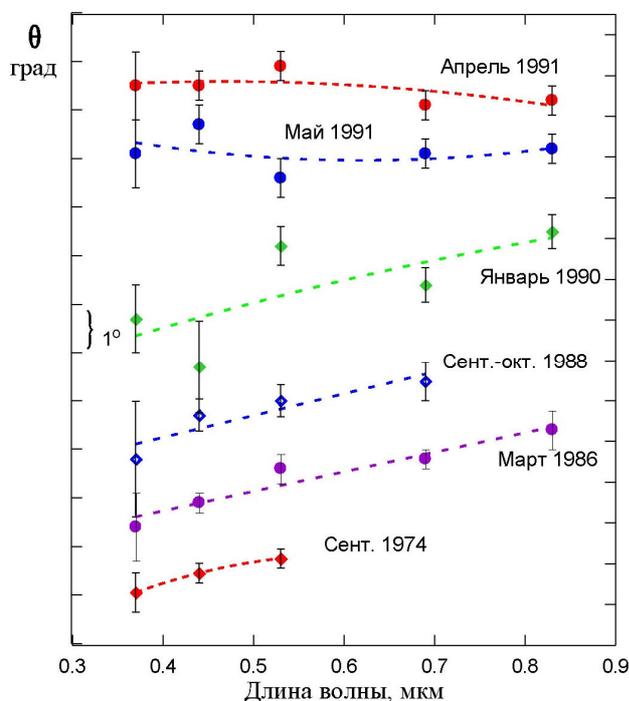


Рис. 1. Спектральная зависимость позиционного угла плоскости отрицательной поляризации Цереры по наблюдениям в разные противостояния

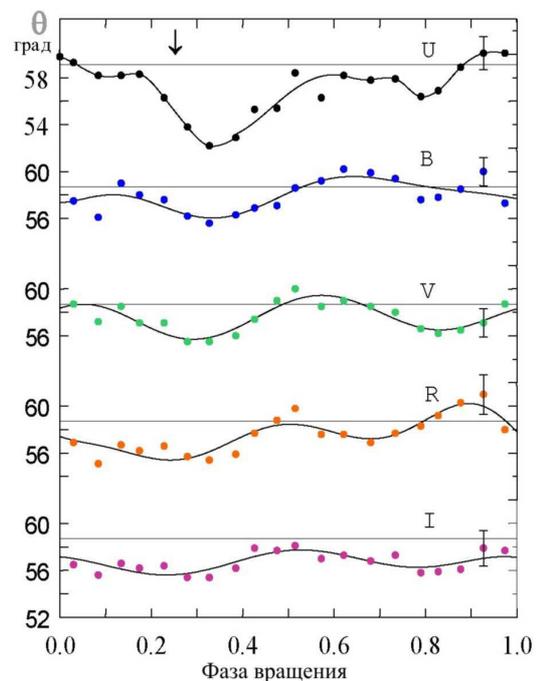


Рис. 2. Вариации позиционного угла плоскости поляризации Весты с вращением ее вокруг своей оси. Стрелкой указано положение центра кратера

В нашем распоряжении оказались также наблюдения Цереры на Советско-Боливийской обсерватории в 1988 г. в полосах UBVR, представленные нам В.К. Розенбуш (ГАО НАНУ). Они были проведены на одноканальном спектрополяриметре и 60-см рефлекторе в период с 5 сентября по 6 октября 1988 г. Фазовый угол изменялся в этот период в пределах $6.9\text{--}8.8^\circ$. Ошибки индивидуальных измерений параметров поляризации были большими, поэтому на рис. 1 приведены усредненные значения угла θ_r по шести подряд наблюдаемым ночам. Отметим, что в противостояние 1988 г. эклиптические координаты астероида $\lambda = 353^\circ$ и $\beta = -16^\circ$ были примерно такими же, как и в 1974 г. ($\lambda = 336^\circ$, $\beta = -16^\circ$). Это означает, что

ориентация Цереры относительно наблюдателя в эти два противостояния была одинаковой и, следовательно, наблюдениям была доступна одна и та же поверхность астероида. Видно, что данные 1988 г. тоже указывают на общее возрастание позиционного угла с длиной волны.

Казалось, что эффект явно существует. Тем не менее, 6 апреля и 2 мая 1991 г. на том же 1.25-м рефлекторе и пятицветном поляриметре были проведены новые наблюдения Цереры при фазовых углах, близких к α_{\min} . Однако эти данные показали почти нейтральный ход угла θ_r по спектру (рис. 1).

Вполне очевидно, что нужны дополнительные высокоточные наблюдения Цереры. Однако чем можно было бы объяснить этот эффект, если он действительно подтвердится? Как известно, в спектре Цереры обнаружена полоса кристаллизационной воды вблизи 3 мкм. Ее связывают не только с присутствием на астероиде гидратированных силикатов, но и с возможностью существования на поверхности Цереры изморози, образующейся при просачивании газообразной H_2O через реголит. В 1990 г. А'Хирн и Фельдман (1992) обнаружили вокруг Цереры эмиссию молекул радикала ОН ($\lambda 3080 \text{ \AA}$), образующихся в результате фотодиссоциации молекул воды. По их данным количество молекул ОН варьируется во времени, а также, вероятно, и в пространстве вокруг Цереры, что согласуется с предположением о существовании на астероиде полярной шапки из замерзшей H_2O , которая в течение зимы аккумулируется, а летом сублимирует.

Однако чувствительность поляриметрии к наличию молекул газа H_2O или ОН все же представляется маловероятной. Насколько более вероятным может быть объяснение наличием самой полярной шапки, то есть инея H_2O , тоже сказать трудно, поскольку размеры кристаллов инея намного больше длины волны видимого излучения. В случае полярной шапки наблюдаемый эффект будет зависеть как от геометрии наблюдения, так и от интенсивности инсоляции видимой поверхности астероида. К сожалению, проверить согласованность результатов наших наблюдений Цереры с гипотезой о северной полярной шапке и о сезонных изменениях на поверхности этого астероида пока не представляется возможным.

3 Астероид 4 Веста

Вариации степени отрицательной поляризации по диску Весты были измерены в США еще в 70-х годах. В 1986 г. в рамках программы "Веста-86" были проведены наблюдения Весты на трех обсерваториях (КрАО, Абастуманской и Советско-Боливийской), которые, в общем, подтвердили данные американцев, но дали в два раза большие вариации параметра P_{\min} . Кроме того, одновременные измерения блеска и поляризации Весты, полученные Н.Н. Киселевым в Боливии (Лупишко и др., 1988), показали четкую обратную корреляцию модуля степени отрицательной поляризации и блеска при вращении астероида вокруг своей оси.

В 1990 г. в КрАО были проведены поляриметрические UVVRI-наблюдения Весты в течение ее полного оборота вокруг оси (5,342 ч.). В полосе V относительные вариации $\Delta P/P$ оказались наибольшими (0,24) по сравнению с измеренными ранее, поскольку были измерены при экваториальном аспекте астероида. Хорошо видна обратная корреляция степени поляризации с кривой блеска. Поскольку последняя обусловлена не столько формой, сколько распределением альбедо по поверхности, то обратная корреляция модуля отрицательной поляризации и блеска Весты есть не что иное, как проявление закона Умова. Таким образом, на примере Весты видно, что закон Умова справедлив и для отрицательной поляризации.

На рис. 2 представлены совершенно новые данные (не только для Весты, но для астероидов вообще) – это вариации позиционного угла плоскости поляризации θ с вращением астероида вокруг своей оси. Отметим, что среднеквадратические ошибки отдельной точки на этом рисунке в среднем составляют от 1.2° до 1.5° . Вариации угла θ оказались максимальными в полосе U ($\Delta\theta = 8^\circ$) и минимальными в полосе I (2.5°). Характер их изменения по спектру, а также с фазой вращения свидетельствует в пользу реальности этих вариаций. Диаграмма

параметров Стокса p_x и p_y на периоде вращения Весты (Лупишко и др., 1999) представляет собой замкнутую циклическую фигуру, которая указывает на периодические изменения этих параметров, а значит и степени поляризации, и угла θ . Повторные наблюдения Весты в 1996 г. тоже при экваториальном аспекте, но только в полосах UVV, подтвердили наличие вариаций позиционного угла θ с вращением и дали даже несколько большую их амплитуду (Лупишко и др., 1999). В оба противостояния имели место отклонения плоскости поляризации от плоскости рассеяния (максимальные – в полосе U), причем в обоих случаях – в одну сторону.

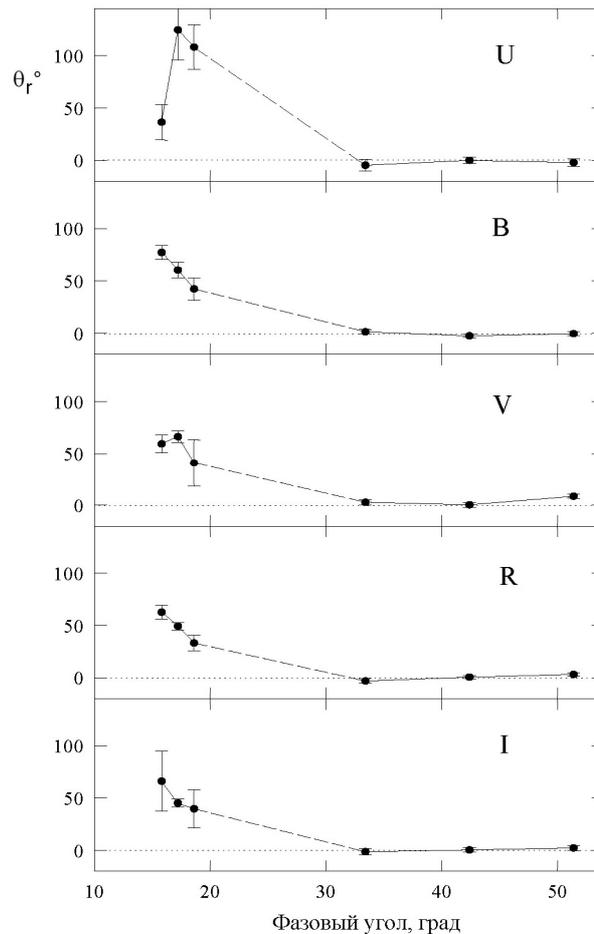


Рис. 3. Зависимость позиционного угла плоскости поляризации астероида 4179 Тютатис от фазового угла

Чем же можно объяснить вариации позиционного угла θ по поверхности Весты? Как известно, космический телескоп Хаббла обнаружил на Весте гигантский кратер диаметром около 460 км (Томас и др., 1997). Ясно, что столкновение, приведшее к его образованию, было близким к катастрофическому для Весты ($D = 525$ км), поэтому в области кратера, который вместе с валом занимает большую часть южного полушария, весьма вероятно существование линейных структур типа “grooves” (борозды, трещины) и склонов, которые могут создавать определенную ориентацию деталей рельефа и вызывать соответствующую асимметрию и, как результат, отклонение плоскости поляризации от плоскости рассеяния. Оказалось, что

измеренная амплитуда и характер вариаций угла θ в оба противостояния хорошо согласуются с топографическими и геологическими особенностями Весты и положением кратера на диске, что говорит в пользу предложенной гипотезы (Лупишко и др., 1999).

4 Сближающиеся с Землей астероиды 4179 Тоутатис и 33342 (1998 WT24)

Наблюдения Тоутатиса проводились в течение шести ночей в декабре 1992 г. – январе 1993 г. в диапазоне фазовых углов $15.8 \div 51.4^\circ$. Полученные параметры фазовых зависимостей поляризации Тоутатиса (Лупишко и др., 1995) дали возможность оценить альbedo (0,16) и диаметр (3,1 км) астероида и подтвердить классификацию Тоутатиса как объекта S-типа.

Напомним, что в системе координат, связанной с плоскостью рассеяния, второй параметр Стокса $Q = P \cdot \cos 2\theta_r$ соответствует поляризации с плоскостью колебаний, перпендикулярной плоскости рассеяния ($P > 0$) или совпадающей с ней ($P < 0$), а третий параметр $U = P \cdot \sin 2\theta_r$ соответствует поляризации с плоскостью колебаний, ориентированной под углом 45° (или 135°) к плоскости рассеяния. Так вот, оказалось, что когда значения параметра Q большие (три даты с $\alpha > 30^\circ$, $Q = 1 \div 4\%$) – параметр U с точностью до ошибок измерений равен нулю. Но вблизи точки инверсии, где Q по своему значению близко к нулю, параметр U , наоборот, становится значимым. Графически это лучше всего видно на зависимости позиционного угла θ_r от угла фазы α (рис. 3). Три разные даты наблюдений с $\alpha = 15.8 \div 18.6^\circ$ показывают, что значение угла θ_r отличалось от 0 или 90° и равнялось примерно 45° . При этом эффект проявляется во всех фильтрах одновременно, значительно превышая ошибки определения угла θ_r . Стоит отметить также, что в полосах В и R, где ошибки угла θ_r в эти три даты минимальны, изменение величины θ_r с углом фазы практически одинаковое. Эта деталь может быть еще одним доводом в пользу реальности замеченного эффекта. Все это свидетельствует об отклонении вектора поляризации от плоскостей перпендикулярной или параллельной плоскости рассеяния и может говорить о присутствии поляризации, не связанной с плоскостью рассеяния. Каких-либо других указаний на подобный эффект у безатмосферных космических тел в литературе не обнаружено.

Мы воспользовались весьма благоприятной возможностью проверить этот эффект на другом приближающемся к Земле астероиде – 1620 Географ (тоже S-тип), который наблюдали в сентябре 1994 г. на этом же телескопе, с тем же поляриметром и также вблизи точки инверсии. Однако заметного отклонения вектора поляризации от плоскости рассеяния, как это имело место у Тоутатиса, не обнаружено (Васильев и др., 1996). Угол θ_r с точностью до погрешностей измерений принимал значения вблизи 0 или 90° . Это дает несколько больше оснований утверждать, что обнаруженный у Тоутатиса эффект реален. Одно из возможных объяснений – это очень сложная форма Тоутатиса, вплоть до двойственности (в пользу чего говорят радарные данные Худсона и др. (1995)), при которой в частности возможна взаимная подсветка компонент отраженным при больших углах и потому достаточно сильно поляризованным излучением. Ориентация плоскости поляризации при этом будет зависеть от геометрии расположения компонент астероида по отношению к плоскости рассеяния.

В рамках кооперативных наблюдательных программ кроме Весты наблюдались и другие астероиды. Так, в декабре 2001 г. астероид группы Атона (т. е. потенциально опасный с точки зрения столкновения с Землей) 33342 (1998 WT24) прошел от Земли на расстоянии 0.0125 а. е. и был доступен для наблюдений. Наблюдения его были проведены на трех обсерваториях (70-см рефлектор НИИ астрономии ХНУ, 1.25-м – КрАО и 2.0 м – обсерватории Терскол на северном Кавказе) в течение 9 ночей и в диапазоне фазовых углов $\alpha = 12 \div 83^\circ$. Полученные фазовые кривые блеска и поляризации позволили уверенно классифицировать астероид как высокоальбедный объект E-типа и определить его период вращения, вытянутость формы, альbedo $p_v = 0.43$ и размеры ($420 \times 330 \text{ м}$). Вместе с имевшимися данными для E-объектов

главного пояса 44 Низа и 64 Ангелина удалось получить полную фазовую кривую поляризации E-астероидов в полосе V, которая показала неожиданно малое значение максимальной положительной поляризации $P_{\max} = 1.68\%$ (против 8.5% для S-астероида 1685 Торо и $25\text{--}30\%$ для пылевых комет) и ее положение на фазовом угле $\alpha = 72^\circ$ (Киселев и др., 2002).

5 Астероиды E-типа 44 Низа и 64 Ангелина и др.

Помимо изложенных выше основных результатов поляризметрических наблюдений астероидов на 1.25-м рефлекторе АЗТ-11 КрАО (полученных по инициативе и с участием автора статьи) Киселевым Н.Н. (НИИ астрономии ХНУ) и Розенбуш В.К. (ГАО НАНУ) совместно с Ефимовым Ю.С. и Шаховским Н.М. (КрАО) на телескопах АЗТ-11 и ЗТШ была проведена программа поляриметрии высокоальбедных астероидов E-типа 44 Низа и 64 Ангелина, в результате которой обнаружен новый оптический эффект у астероидов – так называемый поляризационный оппозиционный эффект (Розенбуш и др., 2005), ранее предсказанный теоретически для высокоальбедных тел (Мищенко, 1993). Эффект проявляется в виде узкого вторичного минимума отрицательной поляризации с амплитудой около $\Delta P = 0.4\%$ на фазовых углах $\alpha \sim 2^\circ$ и объясняется механизмом когерентного усиления обратного рассеяния света.

В 1997–2001 гг. поляриметрические наблюдения 13-ти астероидов главного пояса на 1.25-м телескопе АЗТ-11 КрАО были проведены также по инициативе И.Н. Бельской (НИИ астрономии ХНУ) и ставили своей задачей выявление астероидов с экстремальными поляриметрическими характеристиками. В частности, одним из них оказался низкоальбедный астероид F-типа 419 Аурелия с малой отрицательной поляризацией $P_{\min} = 1.0 \pm 0.2\%$ и наименьшим для астероидов значением угла инверсии $\alpha_{\text{inv}} = 14 \pm 2^\circ$. Найдено, что неглубокая ветвь отрицательной поляризации с малым углом инверсии характерна для поверхностей еще четырех астероидов F-типа (Бельская и др., 2005; Бельская, 2007).

6 Заключение

Изложенные основные результаты поляриметрии астероидов по наблюдениям в Крымской астрофизической обсерватории являются фундаментальными и, как нетрудно видеть, часто находятся на уровне новых поляриметрических эффектов. Они опубликованы в престижных журналах за рубежом, легли в основу одной кандидатской (Васильев, 1996) и использованы в четырех докторских диссертациях по изучению малых тел Солнечной системы: Лупишко Д.Ф. (1998), Киселев Н.Н. (2003), Розенбуш В.К. (2006) и Бельская И.Н. (2007). Все это свидетельствует о том, что, несмотря на поляриметрические исследования астероидов, проводившиеся в Институте астрофизики в Душанбе и в НИИ астрономии в Харькове, вклад Крымской астрофизической обсерватории в поляризацию астероидов на рубеже двух тысячелетий был определяющим. По сути, это был новый этап в поляриметрии астероидов, начатый спустя почти 10 лет после наблюдений в США и нацеленный главным образом на изучение спектральной зависимости поляризации астероидов. Эти наблюдения показали эффективность поляриметрии в изучении оптических свойств астероидов и в значительной мере явились стимулом для постановки в последнее десятилетие подобных UBVRI-наблюдений астероидов в Италии и Аргентине, которые зачастую проводятся в сотрудничестве с НИИ астрономии ХНУ.

Литература

- А'Хирн и Фельдман (A'Hearn M.F., Feldman P.D.) // *Icarus*. 1992. V. 98. No. 1. P. 54.
Бельская И.Н. // Дисс. Оптические свойства поверхностей астероидов, кентавров и тел пояса Койпера. докт. физ.-мат. наук. Харьков. 2007.

- Бельская и др. (Belskaya I.N., Shkuratov Yu.G., Efimov Yu.S., Shakhovskoy N.M., Gil-Hutton R., Cellino A., Zubko E.S., Ovcharenko A.A., Bondarenko S.Yu., Shevchenko V.G., Fornasier S., Barbieri C.) // *Icarus*. 2005. V. 178. No. 1. P. 213.
- Бельская И.Н., Лупишко Д.Ф., Шаховской Н.М. // *Письма в Астрон. журн.* 1987. Т. 13. №. 6. С. 530.
- Васильев С.В. // *Дисс. Поляриметрия астероидов: UBVRI-наблюдения, банк данных и статистический анализ.* канд. физ.-мат. наук. Харьков. 1996.
- Васильев С.В., Лупишко Д.Ф., Шаховской Н.М., Ефимов Ю.С. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1996. Т. 12. №. 4. С. 13.
- Зельнер и Грейди (Zellner B., Gradie J.) // *Astron. J.* 1976. V. 81. No. 4. P. 262.
- Киселев Н.Н. // *Дисс. Рассеяния света на пылевых частицах комет, астероидов и околозвездных оболочек: наблюдения и интерпретация.* докт. физ.-мат. наук. Харьков. 2003.
- Киселев и др. (Kiselev N.N., Rosenbush V.K., Jockers K., Velichko F.P., Shakhovskoj N.M., Efimov Yu.S., Lupishko D.F., Rummyantsev V.V.) // *Proc. of the Conf. "Asteroids, Comets, Meteors"*. ESA-SP-500. Berlin. 2002. P. 887.
- Лупишко Д.Ф. // *Дисс. Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных.* докт. физ.-мат. наук. Харьков. 1998.
- Лупишко Д.Ф., Бельская И.Н., Кварацхелия О.И., Киселев Н.Н., Мороженко А.В., Шаховской Н.М. // *Астрон. вестник.* 1988. Т. 22. №. 2. С. 142.
- Лупишко Д.Ф., Ефимов Ю.С., Шаховской Н.М. // *Астрон. вестник.* 1999. Т. 33. №. 1. С. 50.
- Лупишко Д.Ф. и др. (Lupishko D.F., Vasilyev S.V., Efimov Yu. S., Shakhovskoj N.M.) // *Icarus*. 1995. V. 113. No. 1. P. 200.
- Мищенко (Mishchenko M.I.) // *Astrophys. J.* 1993. V. 411. P. 351.
- Розенбуш В.К. // *Дисс. Свойства рассеянного излучения малых тел Солнечной системы.* докт. физ.-мат. наук. Киев. 2006.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V.K., Kiselev N.N., Shevchenko V.G., Jockers K., Shakhovskoy N.M., Efimov Yu. S.) // *Icarus*. 2005. V. 178. No. 1. P. 222.
- Томас и др. (Thomas P.C., Binzel R.P., Gaffey M.J., Storrs A.D., Wells E.N., Zellner B.H.) // *Science*. 1997. V. 277. P. 1492.
- Хадсон и Остро (Hudson R.S., Ostro S.J.) // *Science*. 1995. V. 270. P. 84.