

УДК 523.3

## Диагностичность исследований оппозиционного эффекта по космическим изображениям

Ю. Г. Шкуратов<sup>1</sup>, М. А. Креславский<sup>1</sup>, А. А. Овчаренко<sup>1</sup>,  
К. Муйнонен<sup>2,3</sup>, Й. Пийронен<sup>3,4</sup>, Х. Картунен<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Астрономічна обсерваторія Харківського університету, Україна

<sup>2</sup>Астрономічна обсерваторія Університету Хельсінкі, Фінляндія

<sup>3</sup>Астрономічна обсерваторія Університету Упсала, Швеція

<sup>4</sup>Науковий центр інституту космічних досліджень, Іспра, Італія

<sup>5</sup>Обсерваторія Туорла, Фінляндія

Надійшла до редакції 01.12.97

Приведено результати досліджень опозиційного ефекту яскравості Місяця за знімками, отриманими КА «Клементина». Показано, що в області фазових кутів  $0-1^\circ$  амплітуда ефекту складає біля 10 %. Для кутів менше  $0.5^\circ$  спостерігається зменшення крутизни фазової функції, пов'язаної з тим, що Сонце має ненульовий кутовий розмір. За допомогою натурних вимірювань досліджено опозиційний ефект снігових покривів. У діапазоні фазових кутів  $0.2-5.0^\circ$  виразний пік яскравості мають зразки забрудненого снігу. За допомогою лабораторного фотометра проведено вимірювання фазових функцій структурних аналогів ґрунту безатмосферних небесних тіл в діапазоні фазових кутів  $0.2-3.5^\circ$ . Показано, що ширина піку яскравості суттєво залежить від розмірів частинок поверхні, а внесок когерентного посилення зворотного розсіювання добре видно на тлі тінювого ефекту навіть у зразках з відносно низьким альбедо.

### ВВЕДЕНИЕ

При фотосъемке земной поверхности или твердых поверхностей других небесных тел из космоса при угле фазы, близком к нулю (когда Солнце светит точно вдоль луча зрения камеры), может наблюдаться диффузное опозиционное пятно, яркость которого на снимке увеличивается к точке нулевого фазового угла. Такое пятно регистрируется также при съемке земной поверхности, проведенной с самолетов.

Интерес к исследованию опозиционных пятен возникал при съемке Луны с орбитальных модулей КК «Аполлон» [16] и Марса с помощью КА «Викинг» [19]. В последнее время он возобновился в

связи с данными, полученными КА «Клементина» [4, 9, 14, 17].

Возникновение опозиционного пятна связано с особенностью поведения фазовой функции яркости поверхностей со сложной структурой. Эта функция резко увеличивается при уменьшении фазового угла, обычно в диапазоне  $0-10^\circ$ . Особенно резкое увеличение, начинающееся при фазовых углах менее  $3^\circ$ , наблюдается у светлых небесных тел, например у астероидов *E*-типа [8] и ярких спутников планет гигантов [18].

До недавнего времени считалось, что этот эффект может быть связан со взаимными затенениями, создаваемыми неоднородностями поверхности [6]. Однако сейчас ясно, что во многих случаях

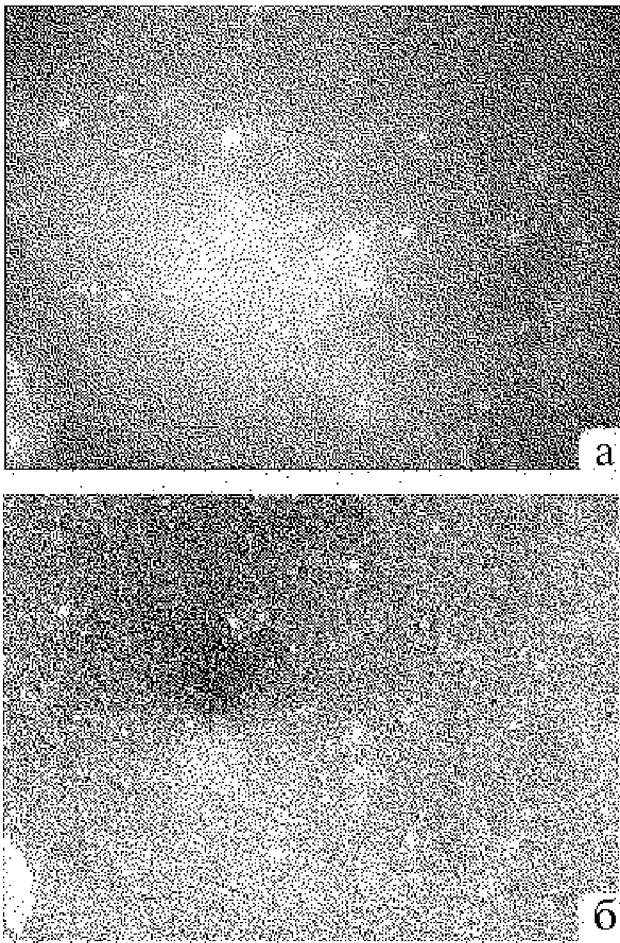


Рис. 1. Изображение участка лунной поверхности в области Центрального Залива по данным КА «Клементина»: *а* — распределение яркости (в центре видно оппозиционное пятно); *б* — композиционное изображение того же участка, передающее в первом приближении распределение первой производной функции, которая описывает оппозиционное пятно

существенный вклад может вносить и так называемое когерентное усиление обратного рассеяния, которое возникает благодаря интерференции лучей, прошедших одни и те же неоднородности среды по прямым и обращенным во времени траекториям.

Применимость когерентного усиления обратного рассеяния к интерпретации оппозиционного эффекта яркости и другого родственного эффекта — отрицательной поляризации — была впервые доказана в работах украинских астрофизиков [1, 2, 10,

11]. Здесь также необходимо упомянуть работы [12, 13], в которых аналогичное использование механизма когерентного усиления было предложено независимо.

Настоящая работа посвящена обсуждению возможностей изучения структурных свойств исследуемой поверхности по характеристикам оппозиционного эффекта. Для этого используются снимки Луны, полученные КА «Клементина», данные натурной фотометрии снежных покровов и результаты измерений лабораторных образцов с помощью фотометра, работающего в диапазоне фазовых углов  $0.2\text{--}3.5^\circ$ .

#### ОППОЗИЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ ЛУНЫ ПО ДАННЫМ КА «КЛЕМЕНТИНА»

Среди большого количества изображений лунной поверхности, полученных КА «Клементина» (камера UVVIS), некоторая часть содержит точку нулевого фазового угла [14]. Камера UVVIS работала в пяти диапазонах длин волн:  $0.41, 0.75, 0.90, 0.95$  и  $1.00$  мкм. В качестве примера на рис. 1 приведено изображение северо-восточной части Центрального Залива LUC2275J.167 (полоса  $\lambda = 0.9$  мкм). Центр этого изображения имеет координаты  $1.3^\circ$  N и  $3.9^\circ$  E. В кадр попадает часть лучевой системы кратера Триснеккер. Снимок охватывает диапазон фазовых углов  $0\text{--}3.5^\circ$ . В середине приведенного изображения видно приблизительно симметричное диффузное образование — это и есть оппозиционное пятно. Его центр определяется не очень уверенно из-за влияния альбедных неоднородностей.

Обычным подходом к построению фазовой функции по изображениям такого рода является метод усреднения яркости точек поверхности, имеющих одинаковый фазовый угол [4]. Этот метод, однако, дает невысокую точность для неоднородных по альбедо участков поверхности. Особенно ненадежны результаты в области очень малых углов фазы, где усреднение производится по небольшому количеству данных. Это, в частности, привело к «открытию» у лунной поверхности узкого оппозиционного пика [14], который на самом деле оказался артефактом [3]. Дело в том, что ширина пика, наблюдаемого у лунной поверхности, не может быть меньше углового диаметра солнечного диска.

Из-за того, что оппозиционные пятна часто маскируются альбедными деталями поверхности, становится актуальной разработка методов, позволяющих увеличить контраст изображения оппозиционных пятен относительно фонового распределения яркости поверхности. В настоящей работе мы рас-

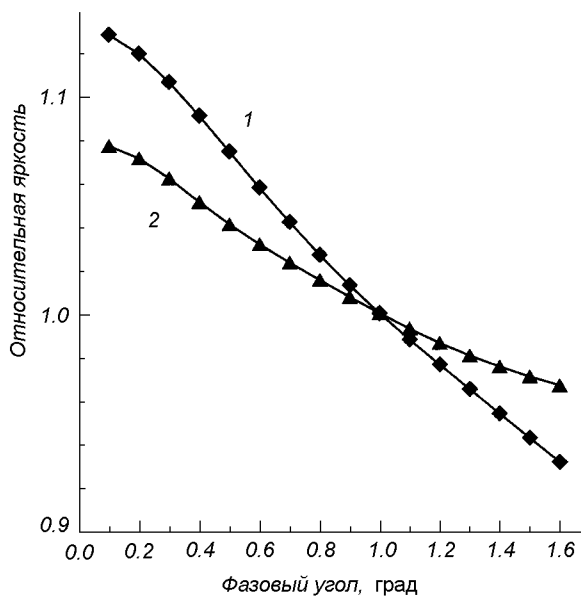


Рис. 2. Фазовая зависимость яркости, восстановленная по разностному изображению для области Центрального Залива (1) и участка в Море Изобилия (2)

смотрим один из таких методов.

При орбитальном движении космического аппарата оппозиционное пятно смещается по поверхности. Если от снимка к снимку это смещение достаточно мало, то частное соседних изображений, совмещенных по альбедным деталям, в первом приближении будет представлять распределение величины, пропорциональной первой производной по направлению от функции, описывающей оппозиционное пятно. По этому распределению может быть восстановлена фазовая функция.

Этот подход был применен для исследования оппозиционного эффекта лунной поверхности по данным КА «Клементина» [17]. К сожалению, при полете этого аппарата не было получено близких изображений в одном спектральном канале, которые бы содержали оппозиционное пятно. Однако такие изображения существуют для близких спектральных каналов. В данной работе в качестве примера мы использовали изображения LUC2275J.167 ( $\lambda = 0.90$  мкм) и LUD2271J.167 ( $\lambda = 0.95$  мкм), полагая, что для них цветовые различия лунных образований достаточно малы.

Изображение, передающее в первом приближении распределение первой производной функции, описывающей оппозиционное пятно, представлено на рис. 1, б. На этом изображении видна практически только одна структура — она связана с оппо-

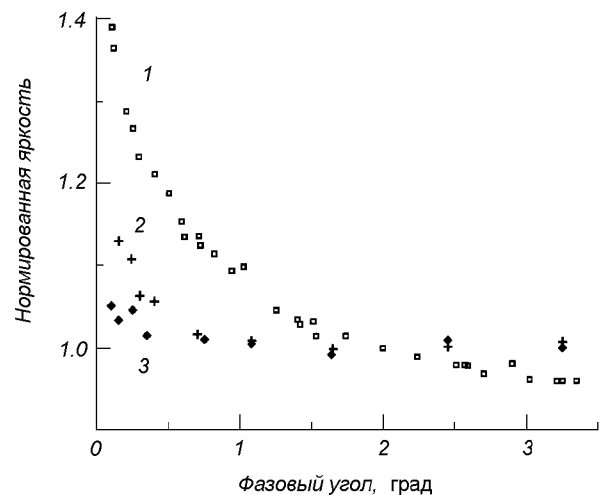


Рис. 3. Фазовая зависимость яркости колец Сатурна (1), загрязненного (2) и чистого (3) снега

зиционным пятном. По этому изображению была построена фазовая функция яркости исследуемого участка поверхности (см. рис. 2). Взаимный сдвиг исходных изображений по фазовому углу оказался около  $0.2^\circ$ , поэтому при восстановлении фазовой функции яркости минимальный угол фазы составил примерно ту же величину.

Аналогичная обработка была проведена для пары кадров LUC3742J.150 ( $\lambda = 0.90$  мкм) и LUD3746J.167 ( $\lambda = 0.95$  мкм); это изображения участка в Море Изобилия с центром  $1.4^\circ\text{N}$ ,  $48.7^\circ\text{E}$ . Среднее альbedo этого участка заметно меньше, чем у предыдущего. Как видно из рис. 2, фазовая функция, соответствующая этому участку поверхности, идет менее круто.

Эти примеры показывают, что характеристики оппозиционного эффекта варьируются по лунной поверхности и в принципе могут использоваться в диагностических целях.

Общей особенностью построенных фазовых функций является уменьшение крутизны фазовой зависимости по мере уменьшения углов фазы после  $0.5^\circ$ . Это поведение легко объясняется сглаживающим действием солнечного диска, угловой размер которого как раз равен  $0.5^\circ$  [3]. Следует также отметить, что амплитуда оппозиционного всплеска яркости исследуемых участков невелика — около 10 % в диапазоне  $0-1^\circ$ . Это заметно меньше, чем для ярких спутников больших планет или колец Сатурна.

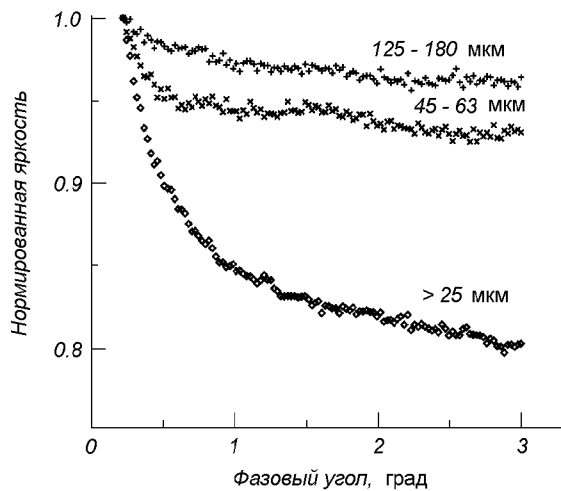


Рис. 4. Фазовая зависимость яркости ( $\lambda = 0.6$  мкм) порошков прозрачного стекла с разными размерами частиц

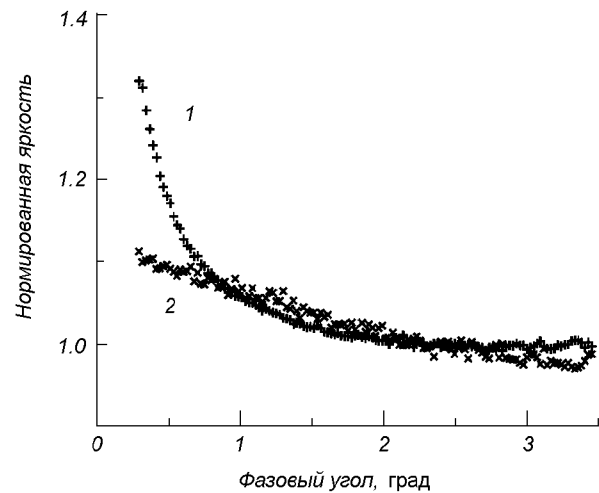


Рис. 5. Фазовая зависимость яркости ( $\lambda = 0.6$  мкм) оксида магния (1) и сажи (2) по измерениям фотометра малых фазовых углов. Размеры частиц образцов порядка 1 мкм и менее

#### ИЗМЕРЕНИЯ ОППОЗИЦИОННОГО ЭФФЕКТА СНЕЖНЫХ ПОКРОВОВ

Исследования ледовых и снеговых полей земной поверхности из космоса является важной задачей как для понимания климатических изменений, происходящих на планете, так и для изучения динамики и вариаций физических характеристик ледников. До сих пор неясно, имеют ли снеговые (ледниковые) земные поверхности оппозиционный эффект. Как это ни странно, ситуация более определена со спутниками планет-гигантов, имеющих ледяную поверхность, и кольцами Сатурна (предполагается, что они также состоят из частиц льда) — в этом случае наблюдаются довольно выраженные пики яркости [5, 18].

Нами были выполнены измерения снеговых покровов с помощью установки, сконструированной в университете Оулу (Финляндия). Измерения были натурными, т.е. проводились вне помещения [15]. Для освещения использовался прожектор диаметром 15 см с расходимостью пучка около  $2^\circ$ , что давало на снегу на расстоянии 40 м пятно диаметром 1.5 м. В некоторых случаях это расстояние удавалось увеличить до 70 м, что позволяло достичь минимального фазового угла  $0.16^\circ$ . Измерения проводились ночью при отрицательных температурах с помощью фотометра. Прожектор и фотометр помещались на площадке, поднятой над снежным полем, т.е. измерения проводились при скользящем освещении (углы скольжения от  $5^\circ$  до  $30^\circ$ ). Это отличает данные измерения от лабораторных, когда, как правило, оси приемника и осветителя

расположены вблизи нормали к поверхности.

Измерялись как участки нетронутого снежного покрова, так и поля, сложенные снежными комьями разной степени загрязненности. В качестве загрязнителя использовался порошок карбида бора, который смешивался со снегом при формировании комьев. Измерения под микроскопом показали, что средний размер частиц льда, входящего в комья, составлял около ста микрон, а размер частиц загрязнителя — несколько десятков микрон.

Результаты некоторых измерений приведены на рис. 3; здесь же для сравнения представлены данные для колец Сатурна [5], также предположительно состоящих из ледяных частиц. Видно, что земному снегу характерен значительно более слабый оппозиционный пик, чем частицам колец Сатурна. Обращает на себя внимание также то, что более загрязненные поверхности имеют более выраженный оппозиционный эффект.

Эти примеры также показывают, что характеристики оппозиционного эффекта потенциально могут быть использованы для целей диагностики изучаемых поверхностей.

#### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фотометрические измерения лабораторных образцов со сложной структурой поверхности были выполнены с целью выяснить диагностичность характеристик оппозиционных пятен, получаемых на космических изображениях, и оценить вклады в

формирование оппозиционного всплеска яркости эффекта затенения и когерентного усиления обратного рассеяния. Мы исследовали модельные образцы, поскольку у них легче контролировать структурные параметры. Измерения выполнялись с помощью лабораторного фотометра в диапазоне фазовых углов  $0.2\text{--}3.5^\circ$  [3]. Кроме специально оговоренного случая, измерения были проведены в неполяризованном свете. Это моделирует солнечное освещение.

Прежде всего следует выявить основные факторы, влияющие на величину оппозиционного эффекта при очень малых углах фазы. Мы провели измерения порошков бесцветного стекла, имеющих разный размер частиц, но примерно одно и то же альbedo. Результаты измерений представлены на рис. 4, из которого хорошо видна размерная зависимость характеристик всплеска яркости: более крупнозернистые порошки показывают более узкие пики. Таким образом, измерения ширины оппозиционных пиков у твердых планетных поверхностей может дать информацию о размере частиц этих поверхностей. На эту возможность указывают также теоретические модели [2, 10].

Соотношение вкладов теневого и интерференционного механизмов в формирование фазовой функции яркости должно зависеть от альbedo поверхности. В поверхностях с высоким альbedo сильно развито многократное рассеяние, а следовательно, вклад теневого эффекта, который проявляется в основном при однократном рассеянии, сильно ослаблен. Таким образом, измеряя фазовую функцию светлого образца, например, оптически толстого ровного слоя порошка MgO, мы можем рассчитывать на то, что получим почти в чистом виде когерентное усиление. На рис. 5 показана фазовая зависимость яркости копоти MgO (альbedo около 95 % относительно стандарта Halon при угле фазы  $5^\circ$ ). Хорошо виден нелинейный всплеск яркости с амплитудой около 30 %. С другой стороны, беря образец с очень низким альbedo (многократное рассеяние отсутствует), можно подавить когерентное усиление, оставив только теневого эффект. На рис. 5 приведены данные для сажи, накопченной на ровную подложку (альbedo около 3 %). Как видно, сажа имеет почти линейный фазовый ход яркости, что резко отличается от образца MgO.

Вклады указанных механизмов формирования фазовой функции яркости могут быть также оценены с помощью измерений, выполненных в линейно поляризованном свете. Действительно, теневого эффект формируется в основном при однократном рассеянии, сохраняющем первоначальное состояние поляризации. Следовательно, однократно рассеян-

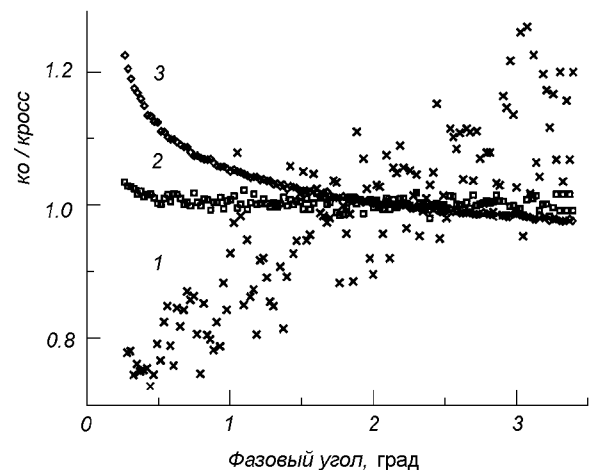


Рис. 6. Фазовые зависимости отношения ко- и кросс-поляризованных составляющих яркости ( $\lambda = 0.6$  мкм): 1 — для сажи, 2 — для порошка базальта с альbedo 15 %, 3 — для поверхности, образованной накопчением MgO. Размеры частиц образцов MgO и сажи порядка 1 мкм и менее, образца базальта — около 40 мкм

ный компонент (и теневого эффект) должны проявиться в ко-поляризованной составляющей рассеянного света. Многократное рассеяние дает вклад и в ко- и в кросс-поляризованную составляющие (при этом возможно когерентное усиление). Таким образом, по соотношению ко- и кросс-поляризованных составляющих отраженного света в принципе можно судить о вкладах рассматриваемых механизмов в фазовую функцию яркости поверхности [7].

На рис. 6 приводятся данные наших измерений для фазовой зависимости отношения ко- и кросс-поляризованных составляющих при ориентации оси поляризатора вдоль плоскости рассеяния. Обращает внимание различие поведения этого отношения для MgO и сажи. В первом случае наблюдается увеличение отношения при уменьшении фазового угла, во-втором — уменьшение. Для порошка базальта с альbedo около 15 % при уменьшении угла фазы наблюдается небольшое увеличение исследуемого отношения. Согласно работе [7] это может говорить о том, что когерентное усиление вносит вклад в фазовую функцию яркости даже сравнительно темных поверхностей. Среднее альbedo лунной поверхности составляет примерно 12 %, что близко к альbedo исследованного образца базальта, т. е. оппозиционный эффект лунной поверхности также частично связан с вкладом механизма когерентного усиления. Поскольку ширина интерференционной составляющей пика яркости сильно зависит от размера частиц рассеивающей поверхности (см. рис. 4), можно надеяться, что будущие исследования оппозиционных пятен позволят проводить

оценку среднего размера частиц лунной поверхности.

Наблюдающийся небольшой оппозиционный эффект снеговых покровов обусловлен когерентным усилением обратного рассеяния (для снега, как и в случае образца MgO, теневой эффект сильно ослаблен). То, что все исследованные снежные покровы показывают сравнительно слабое изменение яркости в диапазоне углов фаз  $0.2\text{--}5.0^\circ$ , связано, вероятно, с тем, что их оппозиционный пик сосредоточен в диапазоне углов менее  $0.2^\circ$ , т. е. мы наблюдаем только край пика яркости. Как известно, ширина оппозиционного пика зависит от величины характерной интерференционной базы, которая является функцией альбеда поверхности: с уменьшением альбеда пик должен расширяться [2]. По этой причине амплитуда всплеска яркости снега при его загрязнении может несколько увеличиваться.

Отметим основные результаты.

1. Предложен новый подход к исследованию оппозиционного пятна твердых поверхностей небесных тел, основанный на анализе снимков, сделанных движущимся по орбите космическим аппаратом.

2. Показано, что изображения Луны, полученные КА «Клементина», могут использоваться для исследования фазовой функции яркости с целью извлечения информации о размере частиц лунной поверхности.

3. Исследования оппозиционного пика снежных покровов показало, что более выраженные пики имеет загрязненный снег. Это связано с тем, что ширина пика увеличивается с уменьшением альбеда поверхности.

Работа выполнена при поддержке Украинского Фонда фундаментальных исследований, Фонда CRDF (грант UG2-295) и гранта Академии наук Финляндии.

1. Шкуратов Ю. Г. О природе оппозиционного эффекта яркости и отрицательной поляризации света твердых космических поверхностей // *Астрон. циркуляр.*—1985.—№ 1400.—С. 3—6.
2. Шкуратов Ю. Г. Дифракционный механизм формирования оппозиционного эффекта яркости поверхностей со сложной структурой // *Кинематика и физика небес. тел.*—1988.—4, № 4.—С. 33—39.
3. Шкуратов Ю. Г., Станкевич Д. Г., Овчаренко А. А., Корохин В. В. Измерения обратного рассеяния света поверхностями типа планетных реголитов при фазовых углах  $0.2\text{--}3.5^\circ$  // *Астрон. вестник.*—1997.—31, № 1.—С. 56—63.
4. Buratti B. J., Hiller J. K., Wang M. The lunar opposition surge: observation by Clementine // *Icarus.*—1996.—124.—P. 490—499.
5. Franklin F. A., Cook A. F. Optical properties of Saturn's rings II. Two-color phase curves of the two bright rings // *Astron. J.*—1965.—70, N 9.—P. 704—720.

6. Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy. I. Theory // *J. Geophys. Res.*—1981.—86, N B4.—P. 3039—3054.
7. Hapke B., Nelson R. M., Smith W. The opposition effect of the Moon: the contribution of coherent backscatter // *Science.*—1993.—260.—P. 509—511.
8. Harris A. W., Young J. W., Contreiras L. et al. Phase relations of high albedo asteroids: the unusual opposition brightening of 44 Nysa and 64 Angelina // *Icarus.*—1989.—81.—P. 365—374.
9. Helfenstein P., Veverka J., Hiller J. The lunar opposition effect: a test of alternative models // *Icarus.*—1997.—128.—P. 2—14.
10. Mishchenko M. I. The angular width of the coherent backscatter opposition effect: an application to icy outer planet satellites // *Astrophys. and Space Sci.*—1992.—189.—P. 151—154.
11. Mishchenko M. I., Dlugach J. M. The amplitude of the opposition effect due to weak localization of photons in discrete disordered media // *Astrophys. and Space Sci.*—1992.—189.—P. 151—154.
12. Muinonen K. Electromagnetic scattering by two interacting dipoles // *Proc. of the URSI Intern. Sym. on electromagn. Theory.* — Stockholm, 1989.—P. 428—430.
13. Muinonen K. Coherent backscattering by solar system dust particles // *Asteroids, comets, meteors: IAU Coll. 160 / Eds A. Milani, M. DiMartino, A. Celino.* — Dordrecht: Kluwer, 1993.—P. 271—296.
14. Nozette S., et al. The Clementine mission to the Moon: Scientific overview // *Science.*—1994.—266.—P. 1835—1839.
15. Piironen J., Muinonen K., Karttunen H. Studies of snow in backscattered light // *Solar system ices: An Inter. Symp.* — Toulouse Univ., 1995.—P. 95.
16. Pohn H. A., Wildey R. L., Offield T. W. Correlation of the zero-phase brightness surge (heiligschein) with lunar-surface roughness // *Apollo 14 Prelim. Sci. Rep. Part F.* — NASA SP-272.—1971.
17. Shkuratov Yu. G., Kreslavsky M. A., Stankevich D. G. On the lunar opposition spike observed by Clementine // *Lunar and Planet. Sci.: Conf. 28-th. LPI. Houston, 1997.*—P. 1307—1308.
18. Thompson D. T., Lockwood G. W. Photoelectric photometry of Europa and Callisto // *J. Geophys. Res.*—1992.—97.—P. 14761—14772.
19. Thorpe T. E. The Mars opposition effect at 20 N latitude and 20 W longitude // *Icarus.*—1979.—37.—P. 389—398.

#### ОППОЗИЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ ЯРКОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ФАКТОР

Ю. Г. Шкуратов, М. А. Креславский, А. А. Овчаренко, К. Муинонен, Дж. Пиронен, и Х. Карттунен

Results of studies of the lunar opposition effect from the Clementine data are presented. The amplitude of the effect is shown to be 10 % in the phase angle range  $0\text{--}1$  degrees. Some leveling down of phase curves at phase angles  $< 0.5$  degree is observed owing to a finite angular size of the Sun. The opposition effect of natural show surfaces has also been studied. A prominent brightness spike is found only for surfaces was studied, and dirty snow samples were found to have a distinct peak and phase angles from  $0.2$  to  $5.0$  degrees. Optical characteristics of structure analogs of planetary regoliths were measured by a laboratory photometer-polarimeter at phase angles  $0.2\text{--}3.5$  degrees. It is shown that: (1) the width of opposition spikes depends significantly on size of scattering surface particles, (2) a contribution from the coherent backscatter enhancement is well detected even for surface with an albedo of about 10 %.