

УДК 523+520.84:520.849+52-123

**В. В. Бусарев<sup>1</sup>, В. В. Прокофьева-Михайловская<sup>2</sup>,  
А. Н. Рублевский<sup>2</sup>, Н. Н. Горькавый<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга  
Московского государственного университета  
13, Университетский пр., Москва, Россия 119992  
busarev@sai.msu.ru

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»  
пгт. Научный, Бахчисарайский район, Крым 98409  
prok@crao.crimea.ua, gorkavyi@yandex.ru, anr@crao.crimea.ua

### **Пятна на астероидах и возможность их изучения наземными средствами**

*Рассмотрение возможных механизмов образования альбедных пятен на астероидах приводит к выводу, что наиболее вероятным из них является ударное кратерообразование и сопутствующие ему процессы. Это подтверждается спектрами отражения астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филомелы, результатами спектрально-частотного анализа размеров деталей на поверхностях 4 Весты и 21 Лютеции, и оценками параметров ударных образований.*

*ПЛЯМИ НА ПОВЕРХНЯХ АСТЕРОЇДІВ І МОЖЛИВІСТЬ ЇХНЬОГО ВИВЧЕННЯ НАЗЕМНИМИ ЗАСОБАМИ, Бусарев В. В., Прокоф'єва-Михайловська В. В., Рублевський О. М., Горькавий М. М. — Розгляд можливих механізмів утворення альбедних плям на астероїдах приводить до висновку, що найбільш вірогідним з них є ударне кратероутворення та супровідні йому процеси. Це підтверджується спектрами віддзеркалення астероїдів 10 Гігії, 135 Герти та 196 Філомели, результатами спектрально-частотного аналізу розмірів деталей на поверхні 4 Вести та 21 Лютеції, та оцінками параметрів ударних утворень.*

*SPOTS ON ASTEROID SURFACES AND POSSIBILITY OF THEIR STUDY BY GROUND-BASED MEANS, by Busarev V. V., Prokofieva-Mikhailovskaia V. V., Rublevskii A. N., Gorkavyi N. N. — Our examination of possible mechanisms of the formation of albedo spots on asteroid surfaces leads to the conclusion that the most probable mechanism of the spot*

*formation is the impact crater generation and some processes associated with it. The conclusion is confirmed by reflectance spectra of the asteroids Hygiea (10), Hertha (135) and Philomela (196), by the results of the spectral-frequency analysis of detail sizes on the surfaces of Vesta (4) and Lutetia (21) as well as by estimates for parameters of impact formations.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основными физическими и физико-химическими эволюционными процессами, протекающими в Солнечной системе в течение последних 3—4 млрд лет, можно считать следующие: 1) миграция малых тел, возникших в разных условиях и имеющих разный состав, по гелиоцентрическим расстояниям, 2) образование кратеров при столкновениях тел, связанный с этим выброс или транспорт вещества, изменение свойств вещества при высоких температурах и давлениях, 3) образование, перенос и аккумуляция пыли в масштабе Солнечной системы, 4) формирование реголита и его перемещение на поверхностях безатмосферных твердых тел, 5) изменение свойств поверхностного вещества рассматриваемых тел под действием солнечного ветра и коротковолнового излучения.

Так как безатмосферные твердые тела подвергаются действию потока падающих тел, то они покрыты слоем раздробленных пород (реголитом) и, как правило, являются сильно шероховатыми. У них наблюдается эффект обратного когерентного рассеяния (увеличение интенсивности диффузно отраженного света при малых фазовых углах [5, 17, 24, 25, 68]) или эффект ближнего поля [15]. Если первый возникает в разреженных ансамблях частиц, то второй — в более компактных структурах [64]. Отраженный такими телами свет содержит значительный диффузный компонент, прошедший сквозь вещество и несущий информацию о его составе. При анализе солнечного света, отраженного от твердого безатмосферного тела, необходимо учитывать и исключать известный «теневой» эффект, описываемый его фазовой функцией.

Регистрация спектров астероида и близкой к нему по угловому расстоянию звезды — солнечного аналога позволяет получить спектральное распределение его геометрического альбедо, или спектр отражения [8, 10, 27]. При спектральных исследованиях лунной поверхности и астероидов было доказано, что их спектры отражения своей формой и наклоном в видимом и ближнем ИК-диапазонах характеризуют минеральный состав вещества благодаря наличию минералогических полос поглощения, хотя последние и могут быть искажены эффектом созревания верхнего слоя реголита [8, 27, 39, 40, 46]. В качестве нового инструмента дистанционных исследований поверхности твердых безатмосферных небесных тел нами был предложен спектрально-частотный метод (СЧМ) [12], который позволяет изучать вариации их спектров отражения по рядам значений спектральных па-

раметров, таких как эквивалентная ширина какой-либо полосы поглощения или показатель цвета в избранном спектральном диапазоне. СЧМ позволяет определять размеры характерных деталей поверхности вращающегося небесного тела, наблюдаемого как точечный объект.

Цель работы — рассмотреть возможности образования и изучения достаточно контрастных альбедных образований на поверхностях астероидов.

### **МИГРАЦИЯ МАЛЫХ ТЕЛ И ЕЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ**

Астероиды, прошедшие стадию магматического плавления (при температурах 1000—1500 °С), в составе которых преобладают высокотемпературные силикаты и другие соединения, движутся в основном во внутренней части Главного пояса астероидов (ГПА), а его внешняя часть состоит из астероидов с примитивным (т. е. не подвергавшимся нагреванию свыше 100—200 °С) составом [47, 60]. Отечественными космогонистами была обоснована возможность выброса протоЮпитером силикатно-ледяных допланетных тел в ГПА в постаккреционный период [13, 31—33]. Обнаружение полосы поглощения гидросиликатов у  $\lambda = 3.0$  мкм в спектрах отражения астероидов магматических типов (примерно у 35 % известных М-астероидов) [65] согласуется с такой идеей. Об этом также свидетельствует обнаружение полосы поглощения гидросиликатов с центром у  $\lambda = 0.43—0.45$  мкм в спектрах отражения астероидов магматических типов [9, 10, 40].

Теоретический анализ ранней тепловой эволюции транснептуновых тел, имеющих силикатно-ледяной состав, при распаде короткоживущего изотопа  $^{26}\text{Al}$  (время полураспада  $7.2 \cdot 10^5$  лет) позволил обосновать возможность образования внутреннего водного океана, и следовательно, гидросиликатов на телах с радиусом более 100 км на периферии Солнечной системы [42]. Было также показано [26], что возникшие на ранней стадии эволюции транснептуновые тела с размерами 1—100 км могли иметь рыхлую структуру и малую плотность 0.7—0.9 г/см<sup>3</sup>. Поэтому обогащенные гидросиликатами тела, вбрасываемые Юпитером в ГПА, должны были иметь низкую механическую прочность и разрушаться при столкновениях больше, чем силикатные родительские тела астероидов. Вероятно, что пылевой компонент раздробленного в постаккреционный период вещества был удален из ГПА под действием светового давления, эффекта Пойнтинга — Робертсона и других факторов. Более крупные фрагменты примитивных тел вследствие их большего момента количества движения, возможно, остались в ГПА и продолжают сталкиваться с астероидами до сих пор [10]. Это подтверждают обнаружения в ГПА ледяных тел с кометной активностью [53].

Т. М. Энеев [38] высказал идею, что многие объекты, сближающиеся с Землей, приходят из пояса Эджворта — Койпера. Исследования показали, что этот пояс является не только источником пыли, но также комет или кентавров [63]. Среди астероидов, сближающихся с Землей, около 20 % объектов могут быть из транснептуновой области [19, 20]. Моделирование миграции астероидов из ГПА показывает, что время до их падения на Солнце составляет всего 200 млн лет [34, 35]. Источниками астероидов, сближающихся с Землей, могут быть ядра короткопериодических комет и резонансные зоны в ГПА [21].

Таким образом, многочисленные данные подтверждают миграцию малых примитивных тел в сторону Солнца и их столкновения с астероидами.

### **УДАРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ ТЕЛ, ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРОВ**

Работа К. П. Станюковича и В. В. Федынского [36] и в настоящее время считается классической по проблеме образования ударных кратеров. Образование эжекты (выброшенного вещества) при бомбардировке астероидов метеоритными телами является важнейшим фактором их эволюции. Была сделана теоретическая оценка размеры пятна эжекты вокруг метеоритного кратера [50]. Ее верхним пределом можно считать 20-кратное превышение размера пятна выброшенного вещества над диаметром кратера. А нижним — примерно два диаметра кратера, где оседает около 50 % выброшенной эжекты [22]. По лунной карте Н. Н. Горькавый измерил размер достаточно однородного пятна эжекты для 23 лунных кратеров с выбросами (<http://www.google.com/moon>). Наблюдаемый средний относительный размер пятна оказался 6.2, что хорошо согласуется с приведенной аналитической оценкой (2—20). Для случая непрочного силикатно-ледяного ударника, который на низкой скорости сталкивается с железо-каменным астероидом, энергия удара будет израсходована на дробление самого метеорита, и размер пятна будет в несколько раз больше размера метеорита. Это справедливо для низкоскоростных столкновений малых примитивных тел с астероидами магматических типов.

Следует также кратко остановиться на специфике ударного кратерообразования на малых телах. Известно, что при падениях крупных тел на монолитную земную поверхность со скоростями порядка 1—10 км/с давления в эпицентре удара могут достигать десятков гигапаскалей, а температура — нескольких тысяч градусов [44, 51, 61]. Результатом их воздействия на силикатное вещество является его полное плавление и частичное испарение, по крайней мере на дне кратера. Но, как показывают исследования, даже при очень сильных ударах, близких к разрушительным, у астероидов (часто представляющих собой не монолитные тела, а «груды булыжников») не происходит глобального разогрева до высоких температур [58]. В эпицентре ударного

взрыва на астероидах происходит только частичное плавление и испарение поверхностного вещества. Даже в таких экстремальных условиях там более вероятно образование брекчий (частично сплавленных конгломератов частиц, в большинстве случаев разнородных как по физическому состоянию, так и по химико-минералогическому составу), чем сплошных расплавов [45, 57, 58]. Поэтому ударный метаморфизм на астероидах имеет локальный характер.

Таким образом, динамическая эволюция малых тел Солнечной системы и их непрерывные столкновения объясняют наличие кратеров и других ударных образований на поверхностях астероидов.

### **ОБРАЗОВАНИЕ ПЫЛИ ПРИ УДАРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ МАЛЫХ ТЕЛ**

Как уже отмечалось, была высказана идея о выбросе протоЮпитером силикатно-ледяных тел из зоны его формирования в ГПА [32, 33]. Последствиями столкновений таких достаточно больших тел с родительскими телами астероидов могло быть не только «выметание» из ГПА значительной части астероидного вещества, но и привнос туда вещества (в виде мелких осколков и пыли), обогащенного водяным льдом, гидросиликатами и органикой. Гипотеза о привносе в ГПА нетипичного вещества была сформулирована по результатам изучения астероидов магматических типов, в спектрах отражения которых была обнаружена полоса поглощения гидросиликатов с центром  $\lambda = 0.43...0.45$  мкм [9, 10, 40, 41]. Можно предполагать, что вещество из зоны формирования Юпитера частично осело на астероиды, изменив состав их поверхности [41].

Планеты и малые тела в Солнечной системе находятся в непрерывном гравитационном и ударном взаимодействии. Изучение взаимосвязей метеороидных роев с кометами и астероидами, динамических и физико-химических свойств малых тел выявляет процессы, действующие в Солнечной системе [4, 18]. Исследования в Харькове на высокочувствительном радиолокационном комплексе дали оценку параметров нескольких сот тысяч метеорных орбит [14]. Было получено, что основной вклад в образование метеорных потоков дали кометы, но есть вклад и астероидов. Похожий вывод был получен и при исследовании ряда комплексов метеороидных тел [28]. За семь лет в метеорных потоках было обнаружено более 30 тел декаметрового размера [7].

Как известно, зодиакальный свет вызван рассеянием солнечного света на пыли, находящейся в межпланетном пространстве [16]. В. Г. Фесенков [37] показал, что эта пыль является продуктом дезинтеграции комет и астероидов. В 1983 г. IRAS [59] зарегистрировал три пылевых пояса, связанные с ГПА. Сделан вывод, что основным механизмом образования межпланетной пыли во внутренней части Солнечной системы являются столкновения астероидов [69]. Была по-

строена физическая модель зодиакального облака из трёх видов межпланетной пыли [48, 49].

Модель, полученная из смеси астероидной (30 %), кометной (36 %) и транснептуновой (34 %) пыли, хорошо согласуется с данными КА «Пионер» (до 50 а. е.) и с точностью до 1 % совпадает с данными COBE по широтному распределению зодиакального свечения [62]. Наилучшее совпадение результатов расчетов со спектральными наблюдениями получено при доле астероидной пыли 30—50 %, кометной — 40—70 %, и транснептуновой — 10 % [54]. Пыль крупнее микрона медленно дрейфует к Солнцу и образует пылевое кольцо, предсказанное по данным IRAS и COBE [56].

Итак, сейчас происходит приток вещества в зону астероидов с периферии Солнечной системы. Постоянное выпадение пыли, удары кометоподобных (ледяных) тел и метеоритов могли изменить состав реголита астероидов.

#### СВОЙСТВА РЕГОЛИТА НА БЕЗАТМОСФЕРНЫХ ТЕЛАХ

Б. Хапке [52] и Л. А. Акимов [1] получили аналитические формулы, описывающие распределение яркости по диску Луны с высокой точностью. Фазовые изменения яркости отдельных деталей лунной поверхности сейчас уже хорошо изучены [2, 23] и объясняются повсеместным наличием реголита. В. В. Шаронов считал, что «лунная поверхность всюду покрыта слоем пыли», который «перемещается с возвышенных участков к низинам, где и накапливается» [6]. О фотометрической неоднородности поверхности астероидов харьковские астрономы написали еще около 30 лет назад [3]. Наличие мелкой пыли в местах пониженного рельефа астероидов (вероятно, вследствие сотрясений их поверхности при ударных событиях) подтверждено многими снимками, сделанными космическими аппаратами. Например, пылевые «бассейны» имеются на астероиде 433 Эрос, что показывают снимки космического аппарата «NEAR — Шумейкер» (<http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/content/numbers/219/23.shtml>). Снимки астероида 25143 Итокава, сделанные КА «Hayabusa», показали, что его поверхность покрыта крупными камнями и мельчайшей пылью, образующей участки с относительно однородными свойствами (<http://www.astronet.ru/db/msg/1221677>). Снимки 21 Лютетии (рис. 1) демонстрируют наличие альбедных пятен.

Оценки толщины реголитового слоя сделаны только для лунной поверхности. В Харьковском университете были использованы радарные и оптические измерения [67] для построения карты распределения толщины реголита на Луне. Для материковых районов характерна толщина 1—18 м. Морская поверхность Луны имеет среднюю толщину реголита около 4 м.

Сейчас активно изучается опозиционный эффект яркости у ряда тел Солнечной системы [68, 72]. Амплитуда опозиционного эффекта



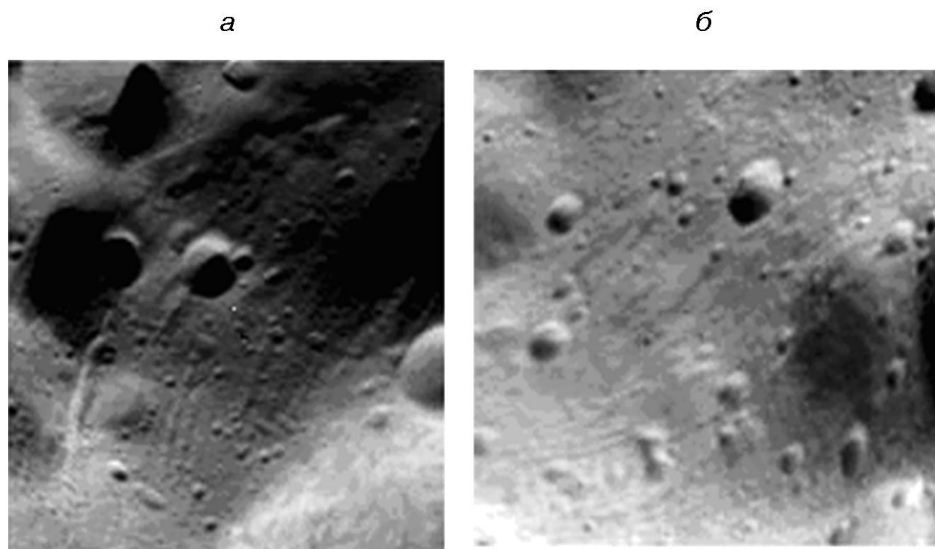


Рис. 1. Снимки поверхности астероида 21 Лютеция, сделанные КА «Розетта» 10 июля 2010 г. ([http://www.esa.int/esaMI/Rosetta/SEM44DZOFBG\\_1.html](http://www.esa.int/esaMI/Rosetta/SEM44DZOFBG_1.html))

в диапазоне фазовых углов 0.2—10 достигает 60 %. Обнаруживаются различия в опозиционном эффекте у разных деталей Луны. На основе теоретического моделирования [17] показано, что для слоев реголита, содержащих субмикронные частицы, только отклонение их формы от сферической приводит к разнице около 20 % величины амплитуды и полуширины опозиционного пика яркости.

Фактором, изменяющим оптические свойства верхнего слоя реголита безатмосферных тел, является также его созревание под действием потока микрометеоритов, солнечного ветра и коротковолнового излучения. Оно выражается в накоплении в зрелом поверхностном веществе агглютинатов (остеклованных конгломератов частиц горных пород) и микронных частиц  $Fe^0$ , а также в образовании тончайших металлических пленок на силикатных частицах [70].

Итак, наблюдаемые на астероидах пятна могут иметь не только «альбедную» природу, связанную с особенностями химико-минералогического состава вещества, но и «фотометрическую», определяемую структурой и микроструктурой поверхности.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ СПЕКТРОВ ТРЕХ АСТЕРОИДОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

На рис. 2 представлены сглаженные и нормированные спектры отражения 10 Гигии (С-тип), 135 Герты (М-тип) и 196 Филомелы (S-тип) — астероидов разных таксономических (спектральных) типов (согласно классификации Д. Толена [71]). Эти спектры рассчитаны по наблюдательным данным, полученным В. В. Бусаревым на 1.25-м телескопе с ПЗС-спектрографом Крымской лаборатории ГАИШ. Отно-

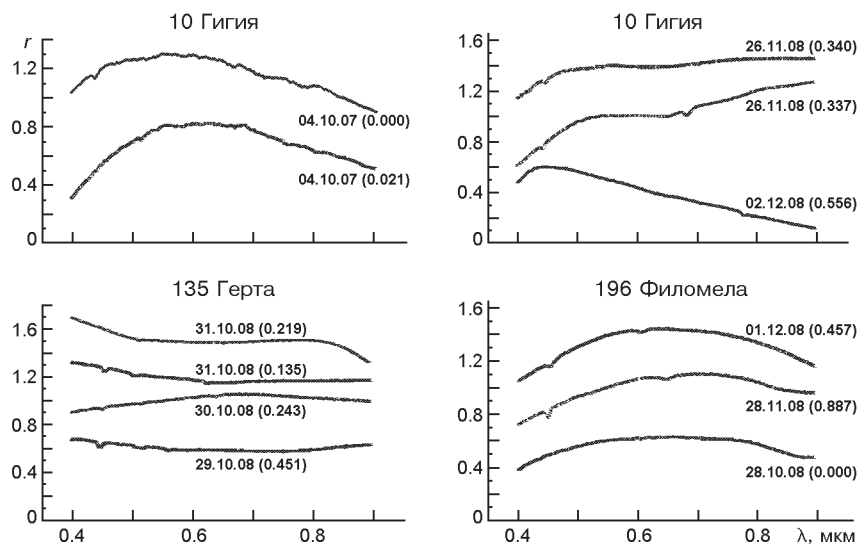


Рис. 2. Нормированные на  $\lambda = 0.55$  мкм спектры отражения астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филомелы. Спектры произвольно смещены вдоль оси ординат. Рядом со спектрами указаны даты и значения относительной фазы вращения астероидов

сительная средняя квадратичная ошибка составляет 1—2 % в середине используемого спектрального диапазона и 5—7 % — на его концах [11]. Изменение формы спектров отражения каждого астероида при вращении (значения относительной фазы вращения указаны в скобках рядом со спектрами; за нулевую принята фаза вращения астероида в момент получения первого спектра для данной даты) характеризует изменение среднего химико-минералогического состава вещества его наблюдаемой полусферы. Видно, что наибольшие изменения при вращении характерны для 10 Гигии, S-астероида с наиболее примитивным составом вещества (см. [46]), несколько меньшие изменения наблюдаются у M-астероида 135 Герты, имеющего по ИК-данным частично гидратированное вещество [65], и изменений практически нет у S-астероида 196 Филомелы. Такое поведение спектральных (и химико-минералогических) характеристик астероидов согласуется с ударным происхождением на них альбедных пятен. Наибольшие изменения состава вещества на Гигии можно объяснить его локальной дегидратацией и потерей других летучих при ударном нагревании в местах падения крупных тел. В то же время отсутствие различий на поверхности Филомелы, вероятно, есть следствие высокотемпературного состава вещества и его устойчивости ударному нагреванию.

#### ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ПЯТЕН НА АСТЕРОИДАХ 21 ЛЮТЕЦИЯ И 4 ВЕСТА

Получение и обработка данных наблюдений астероидов 21 Лютеция и 4 Веста были подробно описаны в работах [10, 12, 29, 30, 50]. Выделим лишь их наиболее важные результаты.



Для получения информации о распределении гидратированных и/или высокоокисленных силикатов на Лютеции и Весте мы избрали обнаруженную в их спектрах отражения полосу поглощения  $\text{Fe}^{3+}$  у  $\lambda = 0.44$  мкм [43]. Частотный анализ величин эквивалентной ширины  $W$  этой полосы поглощения в 40 спектрах отражения Лютеции позволил установить, что на поверхности астероида имеются пятна гидратированных и/или высокоокисленных соединений с размерами в диапазоне 3—70 км [29]. Найденные размеры пятен были подтверждены фотографиями астероида, сделанными КА Розетта 10 июля 2010 г. ([http://www.esa.int/esaMI/Rosetta/SEM44DZOFBG\\_1.html](http://www.esa.int/esaMI/Rosetta/SEM44DZOFBG_1.html)). Применение СЧМ-анализа вариаций величин  $W$  той же полосы поглощения в 91 спектре отражения Весты показало, что более 50 % соответствующих образований на поверхности астероида имеет размеры 13—50 км [30]. Оказалось, что найденный максимум в распределении размеров гидратированных и/или высокоокисленных пятен на поверхности Лютеции и Весты соответствует максимуму распределения ударных кратеров на поверхности Луны, астероидов и других безатмосферных небесных тел [55, 66].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрение эволюционных процессов, происходящих в Солнечной системе, показывает, что основными из них являются гравитационные и ударные взаимодействия тел. Современный облик поверхности астероидов практически полностью сформирован длительным действием ударных событий и солнечного излучения. Поэтому, как установлено космическими аппаратами, для астероидов характерны неоднородный слой реголита, кратеры и другие ударные образования, наблюдаемые в наземные телескопы как пятна. Альбедные пятна могли возникнуть при падениях на астероиды малых тел, мигрировавших с периферии Солнечной системы и имеющих более примитивный состав вещества. Возможны и другие варианты интерпретации пятнообразной структуры поверхности астероидов, которые можно уточнить только при их прямых исследованиях космическими средствами. Но по причине огромного количества уже известных астероидов прямые исследования их большинства в ближайшем будущем нереальны. Предварительное изучение их поверхностей может быть выполнено только дистанционными методами, такими как СЧМ.

В. В. Бусарев благодарит РФФИ (грант 08-02-00931) за финансовую поддержку спектральных наблюдений астероидов.

1. Акимов Л. А. О природе оппозиционного эффекта // Вестн. Харьк. ун-та.—1980.— Вып. 15, № 204.—С. 3—12.
2. Акимов Л. А., Великодский Ю. И., Корохин В. В. Зависимость широтного распределения яркости по диску Луны от альbedo и рельефа // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 2.—С. 181—187.

3. *Акимов Л. А., Лутишко Д. Ф., Бельская И. Н.* О фотометрической неоднородности поверхностей астероидов // *Астрон. журн.*—1983.—**60**, № 5.—С. 999—1004.
4. *Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В.* Метеороидные рои: образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // *Астрон. вестн.*—1991.—**25**, № 4.—С. 378—407.
5. *Бакут П. А., Мандросов В. И.* Статистические и когерентные свойства рассеянных световых полей при различных геометрических параметрах шероховатых поверхностей // *Квант. электроника.*—2006.—**36**, № 3.—С. 239—246.
6. *Барабашов Н. П., Бронштен М. С., Зельцер Н. Л. и др.* Луна / Под ред. А. В. Маркова. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960.—384 с.
7. *Барабанов С. И., Смирнов М. А.* Анализ содержания крупных тел в избранных метеорных и болидных потоках на основе данных метеорной астрономии и наблюдений, проводимых ИНАСАН с 1995 г. // *Околоземная астрономия-2003: Тр. конф.* — С.-П., 2003.—Т. 1.—С. 199—205.
8. *Бусарев В. В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.*—1999.—**33**, № 2.—С. 140—150.
9. *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.—**36**, № 1.—С. 39—47.
10. *Бусарев В. В.* Спектральные исследования астероидов 21 Лютеция и 4 Веста как объектов космических миссий // *Астрон. вестн.*—2010.—**44**, № 6.—С. 539—551.
11. *Бусарев В. В.* О неоднородности вещества астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филомелы по спектрам отражения // *Астрон. вестн.*—2011.—**45**, № 1.—С. 45—54.
12. *Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Бочков В. В.* Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел солнечной системы // *Успехи физ. наук.*—2007.—**177**, № 6.—С. 663—675.
13. *Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафронов В. С.* Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция. — М.: Наука, 1990.—296 с.
14. *Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л., Кручиненко В. Г.* Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. думка, 1989.—296 с.
15. *Гадомский О. Н., Крутицкий К. В.* Эффект ближнего поля в оптике поверхности // *Журн. прикл. спектроск.*—1996.—**63**, № 2.—С. 278—291.
16. *Дивари Н. Б.* Зодиакальный свет и межпланетная пыль. — М.: Знание, 1981.—64 с.
17. *Другач Ж. М., Мищенко М. И.* Когерентное обратное рассеяние как один из возможных механизмов формирования оппозиционного пика яркости у ряда тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.*—1999.—**33**, № 6.—С. 536—546.
18. *Ипатов С. И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. — М: Эдиториал УРСС, 2000.—320 с.
19. *Ипатов С. И.* Формирование транснептуновых тел и их миграция к Земле // *Околоземная астрономия XXI века: Тр. конф.* — М.: ГЕОС, 2003.—С. 388—400.
20. *Ипатов С. И.* Миграция транснептуновых объектов к планетам земной группы // *Околоземная астрономия-2003: Тр. конф.* — Санкт-Петербург, 2003.—С. 87—94.
21. *Казанцев А. М.* Скорости перехода астероидов их главного пояса к планетам земной группы // *Астероидно-кометная опасность-2005: Тр. Всерос. конф.* — Санкт-Петербург, 2005.—С. 163—165.
22. *Каула У.* Введение в физику планет земной группы. — М.: Мир, 1971.—536 с.
23. *Корохин В. В., Акимов Л. А.* Картирование параметров фазовой зависимости яркости лунной поверхности // *Астрон. вестн.*—1997.—**31**, № 2.—С. 143—152.

24. Кузьмин В. Л., Меглинский И. В. Численное моделирование когерентного обратного рассеяния и временных корреляций интенсивности в случайно-неоднородных средах (обзор) // Квант. электроника.—2006.—**36**, № 11.—С. 990—1002.
25. Кузьмин В. Л., Романов В. П. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах // Успехи физ. наук.—1996.—**166**, № 3.—С. 247—278.
26. Макалкин А. Б., Зиглина И. Н. Образование малых тел (планетозималей) в ранней Солнечной системе // Околосолнечная астрономия-2003: Тр. конф. — Санкт-Петербург, 2003.—С. 70—80.
27. Маккорд Т. Б., Адамс Дж. Б. Использование наземных телескопов для определения состава поверхности тел Солнечной системы // Космохимия Луны и планет: Тр. Сов.-амер. конф. по космохимии Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. — М.: Наука, 1975.—С. 547—573.
28. Обрубов Ю. В. Комплексы малых тел Солнечной системы // Астрон. журн.—1991.—**68**, № 5.—С. 1063—1073.
29. Прокофьева В. В., Бочков В. В., Бусарев В. В. Исследование структуры поверхности М-астероида 21 Лютеция спектральным и частотным методами // Астрон. вестн.—2005.—**39**, № 5.—С. 457—468.
30. Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н., Бочков В. В. Водные соединения на поверхности астероида 4 Веста // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2008.—**104**, № 1.—С. 218—228.
31. Рускол Е. Л., Сафронов В. С. Рост Юпитера как важный фактор формирования планетной системы // Астрон. вестн.—1998.—**32**, № 4.—С. 291—300.
32. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969.—С. 179—189.
33. Сафронов В. С., Зиглина И. Н. Происхождение пояса астероидов // Астрон. вестн.—1991.—**25**, № 2.—С. 190—199.
34. Слюсарев И. Г. Оптические свойства Троянцев и миграция планет // IV Барабашовські обласні наукові читання: Тез. доп. — Харків, 2009.—С. 7—8.
35. Смирнов М. А., Баканас Е. С. Статистическая модель миграции астероидов из главного пояса во внутреннюю часть Солнечной системы // Астероидно-кометная опасность-2005: Всерос. конф.— Санкт-Петербург, 2005.—С. 300—303.
36. Станюкович К. П., Федьинский В. В. О разрушительном действии метеоритных ударов // Докл. АН СССР. Новая серия.—1947.—**57**, № 2.—С. 129—132.
37. Фесенков В. Г. Зодиакальный свет, как продукт дробления астероидов // Астрон. журн.—1958.—**35**, № 3.—С. 327—334.
38. Энеев Т. М. О возможной структуре внешних (занаптунных) областей Солнечной системы // Письма в Астрон. журн.—1980.—**6**, № 5.—С. 295—300.
39. 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. C. Karr. — New York: Acad. Press, 1975.—P. 91—116.
40. Busarev V. V. Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // Icarus.—1998.—**131**, N 1.—P. 32—40.
41. Busarev V. V. Where some asteroid parent bodies? // Lunar Planet. Sci. Conf. 35th. — Houston, 2004.—Abstract N 1026.
42. Busarev V. V., Dorofeeva V. A., Makalkin A. B. Hydrated silicates on Edgeworth-Kuiper objects — probable ways of formation // Earth, Moon and Planets.—2003.—**92**.—P. 345—357.
43. Busarev V. V., Volovetskij M. V., Taran M. N., et al. Results of reflectance spectral, Mössbauer, X-ray and electron microprobe investigations of terrestrial serpentine samples // 48th Vernadsky-Brown Microsymp. on Comparative Planetology. —

- Moscow, 2008.—Abstract N 6.
44. *Collins G. S., Melosh H., Marcus R. A.* Earth impact effects program: A web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // *Meteoritics and Planetary Sci.*—2005.—**40**, N 6.—P. 817—840.
  45. *Dodd R. T.* Meteorites — a petrologic-chemical synthesis. — Cambridge: Univ. Press, 1981.—368 p.
  46. *Gaffey M. J., Bell J. F., Cruikshank D. P.* Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 98—127.
  47. *Ghosh A., Weidenschilling S. J., McSween H. Y., Rubin A.* Asteroidal heating and thermal stratification of the asteroid belt // *Meteorites and the early solar system II* / Eds D. S. Lauretta, H. Y. McSween. — Tucson: Univ. Arizona Press, 2006.—P. 555—566.
  48. *Gorkavyi N. N., Ozernoy L. M., Mather J. C., Taidakova T.* Quasi-stationary states of dust flows under Poynting-Robertson drag: New analytical and numerical solutions // *Astrophys. J.*—1997.—**488**.—P. 268—276.—(<http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9706167>).
  49. *Gorkavyi N. N., Ozernoy L. M., Mather J. C., Taidakova T.* The NGST and the zodiacal light in the Solar system // *NGST Science and Technology Exposition* / Eds E. P. Smith, K. S. Long: ASP Ser.—2000.—**207**.—P. 462—467. — (<http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9910551>).
  50. *Gorkavyi N. N., Rublevsky A. N., Prokofjeva-Mikhajlovskaya V. V.* The sizes of impact craters and ejecta spots on asteroids // *Protecting the Earth against collisions with asteroids and comet nuclei* / Eds A. M. Finkelstein, W. F. Huebner, V. A. Shor: Proc. of the Intern. Conf. ACH-2009, St. Petersburg, 21–25 Sept. 2009. — St. Petersburg: Nauka, 2010.—P. 62—64.
  51. *Grieve R. A. F.* Terrestrial impact: The record in the rocks // *Meteoritics.*—1991.—**26**.—P. 175—194.
  52. *Hapke B.* Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory // *J. Geophys. Res.*—1981.—**86**.—P. 3039—3054.
  53. *Hsieh H. H., Jewitt D.* A population of comets in the main asteroid belt // *Science.*—2006.—**312**.—P. 561—563.
  54. *Ipatov S. I., Kutyrev A. S., Madsen G. J., et al.* Dynamical zodiacal cloud models constrained by high resolution spectroscopy of the zodiacal light // *Icarus.*—2008.—**194**.—P. 769—788.
  55. *Ivanov B. A., Neukum G., Wagner R.* Impact craters, NEA and main belt asteroids: Size frequency distribution // *Lunar Planet Sci. Conf. XXX.* — Houston, 1999.—Abstract N 1583.
  56. *Jackson A. A., Zook H. A.* A Solar system dust ring with the Earth as its sheperd // *Nature.*—1989.—**337**, N 6208.—P. 629—637.
  57. *Keil K.* Thermal alteration of asteroids: Evidence from meteorites // *Planet Space Sci.*—2000.—**48**.—P. 887—903.
  58. *Keil K., Stöffler D., Love S. G., Scott E. R. D.* Constraints on the role of impact heating and melting in asteroids // *Meteoritics and Planetary Sci.*—1997.—**32**.—P. 349—363.
  59. *Low F. J., Beitema D. A., Gautier T. N., et al.* Infrared cirrus: New components of the extended infrared emission // *Astrophys. J.*—1984.—**278**.—P. L19—L22.
  60. *McSween H. Y., Ghosh A., Grimm R. E., et al.* Thermal evolution models of asteroids // *Asteroids III* / Eds W. Bottke et al. — Tucson: Univ. Arizona Press, 2002.—P. 559—571.
  61. *Melosh H. J.* Impact cratering: A geologic process. — N. Y.: Oxford Univ. Press, 1989.—245 p.

62. *Ozernoy L. M.* Physical modeling of the zodiacal dust cloud // In: The extragalactic infrared background and its cosmological implications / Eds M. Harwit, M. G. Hauser. — IAU/ASP.—2001.—Symp. N 204.—P. 17—34.—(<http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0012033>).
63. *Ozernoy L. M., Gorkavyi N. N., Taidakova T.* Four cometary belts associated with the orbits of giant planets: a new view of the outer solar system's structure emerges from numerical simulations // *Planet. and Space Sci.*—2000.—**48**.—P. 993—1003.
64. *Petrova E. V., Tishkovets V. P., Jockers K.* Modeling of opposition effects with ensembles of clusters: Interplay of various scattering mechanisms // *Icarus*.—2007.—**188**.—P. 233—245.
65. *Rivkin A. S., Hovell L. A., Lebovski L. A., et al.* The nature of M-class asteroids from 3 m observations // *Icarus*.—2000.—**145**.—P. 351—368.
66. *Schmedemann N., Neukum G., Denk T., Wagner R.* Impact crater size-frequency distribution (SFD) on saturnian satellites and comparison with other solar-system bodies // 40th Lunar Planet. Sci. Conf., 2009.—Abstract N 1941.
67. *Shkuratov Yu. G., Bondarenko N. V.* Regolith thickness mapping of the Moon by radar and optical data // *Icarus*.—2001.—**149**.—P. 329—338.
68. *Shkuratov Yu., Starukhina L., Hoffmann H., Arnold G.* A model of spectral albedo of particulate surfaces: implication to optical properties of the Moon // *Icarus*.—1999.—**137**.—P. 235—246.
69. *Sykes M. V., Greenberg R., Dermott S. F., et al.* Dust bands in the asteroid belt // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 336—367.
70. *Taylor L. A., Pieters C. M., Keller L. P., et al.* Lunar mare soils: Space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe // *J. Geophys. Res.*—2001.—**106**.—P. 27985—28000.
71. *Tholen D. J.* Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 1139—1150.
72. *Zubko E., Shkuratov Y., Mishchenko M., Videen G.* Light scattering in a finite multiparticle system // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*.—2008.—**109**.—P. 2195—2206.

Поступила в редакцию 22.10.10