

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ISSN 2410-4914

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

10

Е. Н. МИРОНОВА

ПЫЛЬ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Москва — 2015

ПРЕПРИНТЫ ФИАН им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

ISSN 2410-4914

Главный редактор В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус,
научный секретарь С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

Редакционная коллегия: В. С. Бескин, А. А. Горбацевич, О. Д. Далькаров,
Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский,
Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин,
Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес редакции: Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН

Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;

E-mail: preprins@sci.lebedev.ru, irinakh@sci.lebedev.ru

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:

<http://preprints.lebedev.ru/>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

Е.Н. Миронова

ПЫЛЬ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

№ 10

Москва 2015

Миронова Е.Н.

ПЫЛЬ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Аннотация

Краткий обзор современных представлений о межпланетном пылевом облаке.

Mironova E.N.

DUST IN THE SOLAR SYSTEM

Annotation

Modern view about interplanetary dust cloud (short review).

ПЫЛЬ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

1. ВВЕДЕНИЕ

Существование пыли в солнечной системе, образовавшейся из газопылевого облака, кажется естественным. При заходе Солнца в западной стороне неба, а при восходе – в восточной можно наблюдать конусообразное свечение, связанное с рассеянием солнечного света на частицах межпланетной пыли. Это явление, названное Зодиакальным светом, впервые было описано Д. Кассини в 1783г. Яркость Зодиакального света падает при удалении от плоскости эклиптики и по мере увеличения углового расстояния от Солнца. В стороне, противоположной Солнцу, наблюдается противосияние: овальное пятно размером $\sim 10-20^\circ$, яркость которого на 10-15% больше яркости ночного неба. Это объясняется увеличением отраженного солнечного света при обратном рассеянии частицами пыли. О яркости Зодиакального света и противосияния в видимой области можно судить по измерениям [1] на длине волны 0.55мк: в единицах 10^{-8} Вт м⁻² ср⁻¹ мкм⁻¹ для эклиптической широты $\beta=0^\circ$ она составляет 11350 при элонгации $(\lambda-\lambda_\odot)=15^\circ$, 227 - при элонгации $(\lambda-\lambda_\odot)=180^\circ$ и 76 - в полюсе эклиптики. Типичная яркость Зодиакального света при больших элонгациях – $\sim 20 \times 10^{-7}$ Вт м⁻² ср⁻¹ мкм⁻¹. Это эквивалентно 200 звездам 28 величины на площади квадратная секунда дуги. Поляризация Зодиакального света (15-20%) обусловлена самой пылью [1, стр.13,14] и в видимой области почти не зависит от длины волны. Разница в измерениях яркости и поляризации у разных авторов может достигать 2-х раз. Это связано как с реальными колебаниям измеряемых величин (например, вследствие движения Земли по орбите, изменениями, связанными с циклом солнечной активности), так и с ошибками измерений.

Исследования пыли в солнечной системе можно разделить на два этапа: наблюдения с Земли и наблюдения с КА (космических аппаратов). Полное и систематическое изложение этих исследований, начиная с самых первых наблюдений можно найти в [1]. За последние 15-20 лет картина Зодиакального облака во многом усложнилась благодаря наблюдениям в ИК области. Помимо равномерно меняющегося распределения яркости от смеси пыли, ассоциирующейся с пылью от комет и астероидов, выявился вклад более мелких структур. Термины Зодиакальное облако и межпланетное облако теперь подразумевают совершенно разные популяции пылевых частиц с разной динамикой и орбитами.

2. ИСТОЧНИКИ ПЫЛИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

На пыль внутри солнечной системы действует сила притяжения Солнца и сила отталкивания – давление солнечной радиации. Эти силы равны по величине для частиц с поперечником ~ 0.0001 мм. Такие частицы теоретически могут двигаться равномерно по прямолинейным траекториям. Частицы меньших размеров (давление солнечной радиации существенно для частиц с массой $10^{-15} < m < 10^{-13}$ г)¹ должны выметаться из окрестностей Солнца, а частицы больших размеров – двигаться вокруг него [2]. Вследствие эффекта Пойнтинга – Робертсона орбиты этих частиц должны все ближе приближаться к Солнцу и, в конце концов, они должны упасть на него. Это абсолютно справедливо для сферических частиц. При более сложной форме возможны варианты, когда частица, двигаясь по спиральной траектории, будет удаляться от Солнца [3].

Частицы пыли в межпланетном пространстве электрически заряжены, поэтому на динамику и распределение пыли свое влияние оказывает также и межпланетное магнитное поле. Заряд частиц пыли определяется равновесным потенциалом между фотоэлектронной эмиссией, связанной с солнечным ультрафиолетом, и электронной рекомбинацией с окружающей плазмой [4].

Планеты аккумулируют вокруг себя пыль, попадающую в область их притяжения. Так на Землю ежегодно выпадают десятки тонн пыли из межпланетного пространства. Особенно много пыли существует вокруг планет-гигантов. Ее концентрация возрастает примерно в 1000 раз при приближении к Юпитеру.

Известно несколько источников пополнения пыли в межпланетном облаке.

- *Пылевая составляющая F-короны Солнца.* Считается, что собственно F-корона заканчивается примерно на $10R_{\odot}$, после чего ее пылевая составляющая переходит в пылевую компоненту межпланетной среды.

¹ Как следует из сравнения распределения по массам зарегистрированных частиц с вычислениями оказываемого на них давления солнечной радиации, пыль в солнечной системе состоит из композиционных материалов, а не чистых однородных веществ [5], поэтому приводимые массы зависят от принятой плотности и формы частицы. Как правило, частицы считают сферическими, а плотность принимают равной 2.5 г см^{-3} .

- *Пояс астероидов* между Марсом и Юпитером, насчитывающий десятки тысяч, а, возможно, и миллионы только сравнительно крупных объектов (от нескольких метров до сотен километров), может являться существенным поставщиком пыли в межпланетное облако. Наблюдения Зодиакального света с КА *Pioneer 10* при элонгациях $110-140^\circ$, со станции *Skylab* и спутника *IRAS* при элонгации 90° дают основания полагать, что Зодиакальное облако имеет плоскость симметрии близкую к орбите Марса [6].

- *Пояс Койпера*. За пределами орбит больших планет на расстояниях от Солнца $\sim 30-50$ а.е. расположен пояс Койпера – дискообразное образование, состоящее из многих тысяч объектов из льда, пыли и смерзшихся камней, являющихся реликтом времен образования солнечной системы. По разным оценкам в поясе Койпера насчитывается до 35000 объектов размером свыше 100 км, а более 400 из них превышают 200 км. Общая численность тел оценивается в несколько миллиардов. Следовательно, пояс Койпера имеет массу, превышающую массу пояса астероидов между орбитами Марса и Юпитера в сотни раз. Долгое время считалось, что пояс Койпера является источником короткопериодических комет с периодом обращения до 200 лет, но в 90-х годах прошлого века было установлено, что он динамически стабилен, а источником короткопериодических комет, скорее всего, является так называемый рассеянный диск. Среди астрономов преобладает мнение, что он сформировался из объектов пояса Койпера за счет гравитационного взаимодействия с внешними планетами. Моделирование показывает, что орбиты объектов рассеянного диска могут быть блуждающими и нестабильными. Кометы, залетающие во внутренние области солнечной системы, пополняют имеющуюся там пылевую компоненту.

- *Облако Оорта*. В 1950г. Я. Оорт на основании анализа орбит долгопериодических комет предположил, что они образуют огромное облако во внешних областях солнечной системы. Облако Оорта может содержать значительную долю массы солнечной системы и простирается до 100 000 а.е. До сих пор облако Оорта считается гипотетическим образованием. Тем не менее, орбиты нескольких недавно обнаруженных карликовых планет позволяют причислить их к объектам из облака Оорта. Долгопериодические кометы из пояса Оорта, приближаясь к Солнцу, также пополняют пылевую компоненту межпланетного облака.

- *Большие планеты*. Как уже упоминалось, концентрация пыли вокруг Юпитера примерно в 1000 раз превышает ее концентрацию в близлежащих областях Солнечной системы. Существует целое семейство захваченных его притяжением комет, которые, в свою очередь, разрушаясь, увеличивают концентрацию пыли.

Изображения спутника Сатурна Фебы, полученные аппаратом *Кассини*, наводят на мысль, что это не что иное, как захваченная планетой бывшая комета.

- *Межзвездная пыль*. Существование межзвездного ветра, открытое в середине 60-х годов прошлого века, объяснило присутствие внутри солнечной системы нейтрального водорода и нейтрального гелия [7,8,9]. Уже тогда были высказаны предположения о возможности проникновения в межпланетную среду пыли из межзвездного пространства. Были построены модели, описывающие поведение этих элементов и их распределение в гелиосфере – области вокруг Солнца, где господствует солнечный ветер. Между гелиосферой и невозмущенной межзвездной средой находится гелиопауза. Размеры гелиопаузы составляют десятки астрономических единиц. Поведение водорода и гелия после проникновения внутрь гелиосферы существенно отличается друг от друга (из-за разницы в массе атомов, разных потенциалов ионизации и т.д.). Более тяжелый гелий, на который практически не действует световое давление, фокусируется за Солнцем в стороне, противоположной набеганию межзвездного газа на Солнечную систему, чего не происходит с более легкими атомами водорода. Многочисленные эксперименты, проведенные с КА, позволили найти параметры окружающей Солнце межзвездной среды: направление относительного движения Солнца и межзвездного ветра, его температуру и величину вектора скорости [10]:

-эклиптические координаты подветренного направления (J2000) $\lambda=74.7^\circ\pm 0.5^\circ$, $\beta=-5.7^\circ\pm 0.5^\circ$;

-групповая скорость атомов на бесконечности $V=24.5\pm 0.2$ км/с;

-температура $T=6500\pm 2000$ К.

В космической плазме частицы пыли заряжены. Если отношение заряд/масса пылевой частицы достаточно мало, она может пройти гелиопаузу и проникнуть в гелиосферу. При прохождении гелиопаузы отсеиваются частицы с массой $m < 10^{-15}$ г. Несущие заряд частицы с массой $m \sim 10^{-14}$ г должны отклоняться от своей траектории под действием солнечного магнитного поля [11,12]. Частицы с массой $m > 10^{-12}$ г уже способны образовывать гравитационный конус [5].

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Межпланетное пылевое облако вносит свой вклад в наблюдаемую яркость неба благодаря рассеянию солнечного света в УФ, оптике и ближней ИК области, а также тепловому переизлучению поглощенной энергии в средней и далекой ИК области.

Долгое время изучение пылевой составляющей солнечной системы ограничивалось фотометрическими наблюдениями с Земли Зодиакального света и противосияния, наблюдениями метеоров, орбиты которых пересекали орбиту Земли, изучением микрократеров на образцах лунной породы, доставленной на Землю. Первые образцы, собранные в стратосфере, а также с КА, находящихся вне земной магнитосферы, дали композиционную и морфологическую информацию о частицах пыли в окрестности Земли. При этом полностью отсутствовали данные о пыли в отдаленных от Земли областях солнечной системы и вне эклиптики.

Новую страницу в изучении межпланетного пылевого облака открыли наблюдения со спутников и КА. Начиная с 70-х годов прошлого века проводились фотометрические наблюдения Зодиакального света в видимой области со спутников серии *OSO*, *HEOS-2*, *Helios*, КА *Pioneer 8,9,10,11*, а также в ИК диапазоне с зондирующих ракет. Запущенный в 1983г. спутник *IRAS*, предназначенный для целей ИК астрономии, одной из своих задач имел исследование Зодиакального облака [13]. Было показано, что Зодиакальное свечение связано, главным образом, с пылью, находящейся между Марсом и Юпитером. ИК исследования Зодиакальной эмиссии (12-100мкм) выявили в структуре пылевого облака астероидальное кольцо, околосолнечное кольцо, а также пылевые хвосты на кометных орбитах. По данным *IRAS* 74% пыли в Зодиакальном облаке кометного происхождения и 26% - астероидального. Показано, что астероидальное кольцо, являющееся результатом производства пыли в полосе астероидов, расположено ближе к Солнцу, чем сам пояс астероидов, что является следствием эффекта Пойнтинга-Робертсона. Наблюдения со спутника *COBE* (прибор *DIRBE*) подтвердили данные *IRAS*[14,15]. Кроме того, были обнаружены еще более тонкие структуры: три пары мигрирующих полос на эклиптических широтах $\pm 1.4^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$. Каждая пара полос обязана своим происхождением определенным астероидам и имеет свое наклонение к эклиптике и свой восходящий узел. *DIRBE* подтвердил существование, открытого *IRAS* околосолнечного кольца – пылевых частиц захваченных Землей идвигающихся по резонансным орбитам вблизи 1 а.е. Кольцо имеет тороидальную форму. Вблизи Земли происходит увеличение его размеров: пылевая компонента образует следующий за Землей каплевидный хвост.

КА *Planck* продолжил наблюдения Зодиакального облака в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах [16]. Многократные измерения одной и той же точки небесной сферы через различные столбы межпланетного пылевого облака позволили провести исследования диффузного пылевого облака и таких

ранее обнаруженных объектов как три астероидальные полосы, околосолнечное кольцо и сопровождающую Землю пыль. Подтверждено ожидаемое уменьшение светимости пылевого облака с увеличением длины волны.

Помимо фотометров, на спутниках и КА стали устанавливать детекторы пылевых частиц, которые позволяли благодаря новым технологиям восстанавливать траектории, измерять массу, проводить химический и изотопный анализ зарегистрированных частиц [17]. Детекторы пылевых частиц на спутниках *HEOS-2*, *Helios*, КА *Pioneer 8,9* позволили обнаружить существование нескольких популяций метеороидов, обладающих различными динамическими свойствами. Детекторы спутника *Hiten*, работавшего два года на орбите с апогеем 1.5 млн. км, а затем год на лунной орбите с максимальным удалением от Луны 500000 км, зарегистрировали более 500 случаев попадания пылевых частиц, 20 из которых были классифицированы как межзвездные [18]. КА *Cassini* зарегистрировал образцы межзвездной пыли на расстояниях до 0.7 а.е. [19]. На КА *Cassini* были проведены первые *in situ* измерения заряда межпланетных частиц. У шести частиц были зарегистрированы заряды от 1.3 до 5.4 фКл [22].

Наиболее полные исследования частиц межзвездной пыли *in situ* были проведены КА *Galileo* и *Ulysses* [20,21,23,24,25]. В основу определения происхождения регистрируемых частиц были положены следующие соображения.

- Межпланетная и межзвездная компоненты пылевого облака имеют разное пространственное распределение: межпланетная пыль строго концентрируется к плоскости эклиптики, в то время как пыль межзвездного происхождения должна обнаруживать небольшую зависимость от эклиптической широты.

- На этапе внеэклиптического полета орбита *Ulysses* была перпендикулярна потоку набегающей на солнечную систему межзвездной пыли и геометрия наблюдений была такова, что при вращении аппарата регистрировался максимум при попадании на направление набегания межзвездного ветра. В дополнение, афелий орбиты находился по ту сторону Солнца, когда поток межзвездной пыли был направлен в сторону, противоположную орбитальному движению межпланетной пыли. Поэтому поток межпланетной пыли, имеющий сильный радиальный градиент, был в минимуме, а поток межзвездной пыли доминировал.

КА *Galileo*, полет которого проходил в плоскости эклиптики, зарегистрировал 337 случаев попадания межзвездных пылинок на участке от 3.5 а.е. до окрестностей Юпитера [26,27].

Аппаратом *Ulysses* были обследованы области от 1 до 5.4 а.е. от Солнца и эклиптические широты от -80° до $+80^\circ$. Внутри 3 а.е. регистрировались частицы с массами до 10^{-9} г, за 3 а.е. – $\sim 10^{-14}$ г, т.е. прослеживалась закономерность: при удалении от Солнца регистрировались все меньшие массы. Первая идентификация межзвездных частиц стала возможной после пролета Юпитера, когда орбита стала почти перпендикулярна плоскости эклиптики. Детектор пыли измерял массу, скорость, электрический заряд и направление полета зарегистрированной частицы. Чувствительность детектора в 10^6 раз превосходила все приборы, использовавшиеся ранее для прямых исследований пыли в межпланетном пространстве. На участке орбиты от 1.8 до 5.4 а.е. было зафиксировано 313 случаев попадания частиц межзвездной пыли микронных и субмикронных размеров с массами от 3×10^{-13} до 5×10^{-11} г [26,27]. Анализ показал, что они движутся примерно в том же направлении, что водород и гелий межзвездного ветра ($\lambda=259 \pm 20^\circ$, $\beta=8 \pm 10^\circ$, эклиптические координаты) со скоростью ~ 26 км/с. Средний поток межзвездных пылевых частиц через гелиосферу был оценен в 1.5×10^{-8} см $^{-2}$ с $^{-1}$. В потоке преобладают частицы с массой 3×10^{-13} г, соответствующей радиусу ~ 0.3 мкм при плотности 2.5 г см $^{-3}$ и сферической форме.

Следует заметить, что приведенные результаты *in situ* измерений могли быть получены только статистическими методами из-за существующих неопределенностей в измеренных скоростях и направлениях.

Запущенные в 1977 г. две автоматические межпланетные станции *Voyager* для исследования больших планет и их спутников после пересечения орбиты Плутона перешли к исследованию удаленных областей солнечной системы. Оказалось, что плазменный детектор прибора PSW способен регистрировать удары пылевых частиц микронных размеров (10^{-10} - 10^{-11} г). Найденная средняя скорость составила 4-5 ударов /час (оценка плотности – 4×10^{-8} м 3), причем на расстояниях от 5 а.е. до 100 а.е. не обнаружена зависимость количества ударов от расстояния от Солнца [28,29]. Рассмотрев все возможные источники, авторы пришли к выводу, что они регистрировали пыль межзвездного происхождения.

4. МОДЕЛИ МЕЖПЛАНЕТНОГО ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА

Зная распределение пыли в солнечной системе, можно, когда это необходимо, исключить ее вклад в астрономические наблюдения. Трудности построения модели межпланетного пылевого облака связаны с тем, что оно представляет собой конгломерат частиц пыли различного происхождения. Компоненты пылевого облака отличаются друг от друга по размеру и форме, по составу, имеют разные альбедо. Так, например, альбедо пылинок кометного происхождения намного ниже, чем альбедо пылинок из других источников.

В настоящее время развиты два типа трехмерных моделей межпланетного пылевого облака:

- модели облака эллипсоидальной формы с поверхностями равной плотности;
- двухкомпонентные модели, в которых зависимость плотности частиц от расстояния от Солнца накладывается на другую компоненту пылевого облака, зависящую от эклиптической широты.

Все модели несут в себе неопределенности, связанные с отсутствием детальной информации о свойствах и пространственном распределении пылевых частиц межпланетного облака и его составляющих.

Для интерпретации наблюдений прибора DIRBE (спутник *COBE*) была построена трехмерная параметрическая модель, более ранние версии которой были описаны в [30,31]. Спутник *COBE* был запущен в 1989 г. в точку либрации L_2 . Целью запуска было исследование неоднородностей реликтового излучения в субмиллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda=0.5 - 4$ мкм), что потребовало тщательного исключения из наблюдений фона, создаваемого межпланетным пылевым облаком. Учитывался вклад основного Зодиакального облака, вклад астероидальных полос и околосолнечного кольца, включая пыль на резонансных орбитах вблизи 1 а.е. Вклад межзвездной пыли оказался незначительным. При подборе параметров модели требовалось соответствие вычисляемой яркости меняющимся во времени наблюдениям в фиксированных направлениях по всей небесной сфере. Точность вычислений оценена в 2%. Составлены карты распределения яркости по небесной сфере в нескольких длинах волн. Показано, что там, где нет ярких внегалактических источников, зодиакальный фон меняется от 2/3 в ближнем ИК диапазоне (1.25 – 3.5 мкм) до 90% в среднем ИК диапазоне (4.9 – 60 мкм). Даже в далекой ИК области в высоких галактических широтах на волне 240 мкм зодиакальная составляющая может достигать 20%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали наблюдения, основной вклад в Зодиакальное свечение вносит пыль, находящаяся в области пояса астероидов. То же самое, по-видимому, можно сказать и о противосиянии. Во всяком случае, в марте 1972 г. противосияние было видно с КА *Pioneer 10*, находящегося на расстоянии 10 млн. км от Земли [32].

В области ИК длин волн 1-100 мкм межпланетная пыль дает основной вклад в диффузную яркость неба. Этот же вклад доминирует в области 10 – 60 мкм почти во всех направлениях за исключением областей около галактической плоскости. ИК наблюдения с СОВЕ связывают свечение Зодиакального облака исключительно с пылевыми частицами межпланетного происхождения. Из наблюдений, полученных с КА *Ulysses*, следует, что вклад частиц межзвездного происхождения в свечение газа на 1 а.е. – не более 4%. Наблюдаемая яркость Зодиакального света обусловлена, главным образом, рассеянием света на частицах пыли от 1 мкм до 100 мкм. При этом основной вклад дают частицы пыли размером ~30 мкм [33]. За орбитой Юпитера преобладает пыль межзвездного происхождения микронных и субмикронных размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Interplanetary dust, Springer, 2001, Eds. Grün E. et al.
2. Mukai T. and Yamamoto T. *A&A* **107**, 97 (1982).
3. Klacka J. *EM&P* **64**, №2, 125 (1990).
4. Horányi M. *Annu. Rev. Astrophys.* **34**, 383 (1996).
5. Mann I., Kumura H. *JGR* **105**, №A5, 10317 (2000).
6. Misconi N.Y. et al. *P&SS* **38**, 1461(1990)
7. Bertaux J.L., Blamont J.E. *A&A* **11**, 200 (1971).
8. Thomas J.E., Krassa R.F. *A&A* **11**, 218 (1971).
9. Blum P.W., Fahr H.J. *A&A* **4**, 280 (1970).
10. Vallergera J.V. et al. *A&A* **426**, 855 (2004).
11. Draine B.T. and Salpeter E.E. *ApJ* , **231**, 77 (1979).
12. Mukai T. *A&A* **99**, 1 (1981).
13. Low F.J. et al. *ApJ* **278**, L19 (1984).
14. Spiesman W.J. et al. *ApJ* **442**, 662 (1995).
15. Kelsall T. et al. *ApJ* **508**, 44 (1998).
16. Age P.A.R. et al. *A&A* **571**, A14 (2014).
17. Ratcliff P.R. et al. *British Interplanet. Soc. J.* **45**, №9, 375 (1992).
18. Svedhem H. et al. *ASP Conference Series* **104**, 27 (1996).
19. Altobelli N. et al. *AIP Conf. Proc.* **761**, 149 (2005).
20. Kempf S. et al. *Icarus* **171**, 317 (2004).
21. Grün E. et al. *A&A Suppl. Ser.* **92**, 411 (1992).
22. Grün E. et al. *P&SS* **43**, Iss. 8, 953 (1995).
23. Mann I. and Grün E. *P&SS* **43**, Iss.6, 827 (1995).
24. Grün E. et al. *P&SS* **43**, Iss.8, 971 (1995).
25. Baguhl M. et al. *Sci.* **268**, 1016 (1995).
26. Gruen E. et al. *A&A* **286**, 915 (1994).
27. Frish P.C. et al. *Aph. J.* **525**, 4942 (1999).
28. Gurnett D.A. et al. *Workshop on Dust in Planetary Systems* (2005).
29. Wang Z. *Thesis for the Master degree in Physics*, The University of Iowa, December 2004.
30. Reach W.T. et al. in *Unveiling the Cosmic Infrared Background*, p. 37, New York: AIP, 1996, Ed. E. Dwek.
31. Franz B.A. et al. in *Unveiling the Cosmic Infrared Background*, p. 296, New York: AIP, 1996, Ed. E. Dwek.
32. Hanner M.S. and Weinberg J.L. *S&T* **45**, 217 (1973).
33. Grün E. et al. *Icarus* **62**, 244 (1985).

Елена Николаевна МИРОНОВА

Пыль в Солнечной системе

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 140 экз. Заказ №47. П.л.1
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН
119991 Москва, Ленинский проспект 53