

(ДТОО «Астрофизический институт им. Фесенкова», Алматы, Республика Казахстан)

## ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ОБЛАСТИ СУБЛИМАЦИИ ОКОЛО ЗВЕЗДЫ СОЛНЕЧНОГО ТИПА

### Аннотация

*Цель.* Исследование орбитальной эволюции силикатных пылевых частиц из базальта и вулканического стекла в процессе испарения. Сравнение результатов для Солнца с реальным распределением энергии в спектре и звезды – солнечного аналога с модельным распределением согласно функции Планка с  $T_{\text{eff}} = 5779\text{K}$ .

*Методы исследований.* Численное моделирование. Расчеты температуры пылевых частиц основаны на решении уравнения теплового баланса в соответствии с их материалом, размерами и расстоянием от Солнца. Использована теория Ми для однородных сферических частиц. Выбраны два сорта силикатов с разными индексами рефракции: базальт со средними абсорбционными свойствами и вулканическое стекло, слабо поглощающее свет (р-обсидиан). Учитывалось влияние давления радиации и солнечного ветра, а также эффектов торможения Пойнтинга-Робертсона на динамику пыли.

*Область применения.* Эволюция звезд солнечного типа с газопылевыми дисками.

*Результаты и выводы.* Температурный режим пыли отличается от режима абсолютно черного тела и сильно зависит от размера частиц и материала, из которого они состоят. Показано, что на расстояниях до 2.2 солнечных радиусов, околосолнечная пыль в виде облака твердых частиц существовать не может, так как степень ее нагрева солнечным излучением превосходит температуру плавления силикатов всех типов. Максимальную температуру имеют частицы промежуточных размеров радиусами около 0.05-0.5 мкм.

Радиационное давление оказывает сильное селективное воздействие на пылинки, как по размерам частиц, так и по типу материала. Максимальное давление радиации испытывают частицы радиусами 0.15-0.3 мкм.

Получено, что граница области сублимации рассмотренных силикатов для солнечного аналога в 1.5-2 ра-за дальше, чем для реального Солнца, что свидетельствует о сильной зависимости результатов от принятой модели распределения энергии в спектре Солнца.

Независимо от модели, обсидиановые частицы радиусами 0.15-0.4 мкм покидают Солнечную систему после отрыва от родительского тела, остальные частицы полностью испаряются. Модельная зависимость для базальтовых частиц проявляется не только в виде сдвига границы полного испарения, а даже в финальной «судьбе» частиц.

Базальтовые частицы с радиусами 0,15-0,5 мкм в модели Солнце-звезда покидают Солнечную систему, также как и частицы р-обсидиана, остальные частицы полностью испаряются. В модели реального Солнца все базальтовые частицы радиусами больше 0.15 мкм покидают Солнечную систему.

Аппроксимация спектра звезды функцией Планка приемлема лишь для частиц со слабыми абсорб-ционными свойствами типа вулканического стекла, для сильно поглощающих пылевых частиц такое при-ближение следует применять с осторожностью.

**Ключевые слова:** пылевые частицы, орбитальная эволюция, сублимация пыли, звезды солнечного типа, околозвездный диск.

**Тірек сөздер:** тозаңды бөлшектер, орбиталық эволюция, тозаңның сублимациялануы, күн тәрізді жұл-дыздар, жұлдыз маңындағы дөңгелек (дискі).

**Keywords:** dust grains, orbital evolution, dust grain sublimation, solar type stars, circumstellar disk.

**Введение.** Область сублимации пыли около Солнца интересна тем, что там происходят многие процессы, связанные с взаимодействием и обменом веществом между солнечной короной и окружающим зодиакальным пылевым облаком. Сюда же попадают так называемые «солнцескребущие» кометы, обильно рассыпающие свое вещество, которое частью падает на Солнце, а частью гонится световым давлением прочь от Солнца. Эта область пока недоступна для наблюдений в полном объеме из-за близости яркого солнечного диска. Наземные наблюдения этой области, так называемой пылевой или F-короны, крайне редки, поскольку они становятся возможными только во время полных солнечных затмений, когда фон неба значительно ослаблен.

Кроме оптических наблюдений, во 2-й половине 20-го столетия проведены наблюдения пыле-вой короны в инфракрасном диапазоне как наземные, так и с помощью ракет. Эти наблюдения позволили обнаружить области повышенной концентрации пыли на некоторых расстояниях от Солнца. Наблюдения Lena et al., 1974 [1] в среднем ИК диапазоне спектра на  $\lambda = 8 \div 13$  мкм показали высокий общий уровень интенсивности существенно выше, чем в ближней ИК области. Этот факт был объяснен избытком концентрации малых силикатных частиц в F-короне.

С помощью недавних космических экспериментов COBE/DIRBE в инфракрасном диапазоне спектра была исследована структура межпланетного пылевого облака и получена его модель [2, 3]. Эти наблюдения были ориентированы на исследования слабого фона неба на больших расстояниях от Солнца.

Для анализа орбитальной эволюции пылевых частиц вблизи звезд различных спектральных классов помимо сил гравитации требуется учет большого количества других факторов, которые зависят от распределения энергии в спектре звезды, материала частиц, их размеров, температуры нагрева и т.д.

С появлением новых данных об индексах рефракции различных материалов в большом интервале длин волн появилась возможность рассчитать по теории Ми эмиссионные

спектры этих материалов для различных температур ( $T$ ) и размеров частиц ( $s$ ). Были рассчитаны распределения температуры пылевых частиц с использованием реального спектра Солнца [4], проведены первые численные расчеты орбит частиц в околосолнечной области сублимации [5-8], а также рассчитаны температуры и световое давление в зависимости от размеров частиц и их расстояний для нескольких звезд [9]. Все подобные работы указывают на наличие области, где спиральное движение частиц внутрь по направлению к Солнцу в соответствии законом Пойнтинга-Робертсона прекращается и начинается движение наружу, прочь от Солнца.

Распределение энергии в солнечном спектре изучено достаточно хорошо на большом интервале длин волн. Для подавляющего большинства звезд это не так, и в расчетах приходится использовать модель абсолютно черного тела. Поэтому возникает вопрос о пределах применимости такого упрощенного подхода.

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу расчетов орбитальной эволюции пылевых частиц в околосолнечной области для реального распределения энергии в солнечном спектре [10] и для солнечного аналога с распределением энергии согласно функции Планка:

$$B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1},$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $T = T_{eff} = 5779\text{K}$  – эффективная температура фотосферы в  $^{\circ}\text{K}$  согласно [10],  $C_1, C_2$  – радиационные постоянные.

Выбраны силикатные материалы: полупрозрачное слабо поглощающее вулканическое стекло (р-обсидиан) и базальт, обладающий средними абсорбционными свойствами.

**Модельные предположения.** Расчеты орбитальной эволюции проведены с учетом испарения пылевых частиц. Темп сублимации (испарения) зависит от температуры нагрева пылевых частиц (гранул) в космическом пространстве в зависимости от радиусов пылинок, материала, из которого они состоят, и расстояния до Солнца. Все практически важные параметры, характеризующие взаимодействие сферических пылевых частиц с излучением, рассчитываются по теории Ми [11, 12]. Учитывалось влияние радиационного (светового) давления на пылевые частицы, давление солнечного ветра, а также эффектов торможения Пойнтинга-Робертсона на динамику пыли. При этом предполагается, что пылевые гранулы нагреты изотермично, сублимируют изотропно, реактивная сила отсутствует. Кроме того, мы пренебрегаем влиянием планет, столкновениями между гранулами и считаем их электрически нейтральными. Предполагается, что пылинки имеют форму шара и однородны по составу. Проанализирован диапазон радиусов частиц базальта и р-обсидиана ( $s$ ) от 0.01 до 100 мкм.

**Исходные данные.** Таблицы по распределению энергии в солнечном спектре для интервала длин волн  $\lambda$  от  $\lambda_1 = 0.0075$  мкм до  $\lambda_2 = 50$  мкм, взятые из книги Макаровой и др. [10], переведены в единую систему единиц дж/(сек·м<sup>2</sup>·мкм·ср). В этих же пределах взяты таблицы комплексных индексов рефракции выбранных материалов:  $m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$  с добавлением экстраполированных величин со стороны ультрафиолета [13,14]. По нашим

оценкам, вклад двух неучитываемых интервалов  $(0, \lambda_1)$  и  $(\lambda_2, \infty)$  во всех практически важных случаях менее 2%.

Параметры  $n, k$  – это входные параметры теории Ми, они зависят от длины волны  $\lambda$  и типа вещества, обычно задаются в табличном виде, для каждого вещества отдельно. В теории Ми широко используется алгебра комплексных чисел. Однако все практически важные параметры, характеризующие взаимодействие пылевых частиц с излучением, в том числе эффективные факторы поглощения ( $Q_{abs}$ ) и светового давления ( $Q_{pre}$ ) имеют вещественные значения.

Плотность вещества пылинки  $\delta = 2.5 \text{ г/см}^3$ . Молекулярный вес  $M_g$  для вещества принят равным 67.

Типичные параметры солнечного ветра взяты по двухжидкостной модели, полученной по результатам многолетних наблюдений [15] в интервале расстояний от 2 до 270 солнечных радиусов с учетом радиальной и тангенциальной составляющих скорости солнечного ветра. Область коротации солнечного ветра находится внутри 10 солнечных радиусов.

Все расчетные программы написаны на языке 'C' в среде TURBO-C++, отлаживались под управлением операционной системы WINDOWS-XP.

**Расчеты теплового баланса.** Для расчета температуры пылинки используется естественное физическое условие для теплового равновесия, то есть поглощаемая энергия должна быть равна излучаемой энергии:

$$E_{abs} = \Omega \cdot s^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, m, s) \cdot F(\lambda) d\lambda = E_{rad} = 4\pi \cdot s^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, m, s) \cdot B(\lambda, T) d\lambda \quad , \quad (1)$$

где  $E_{abs}$  – энергия, поглощаемая частицей в интервале длин волн  $(\lambda_1, \lambda_2)$ ,  $\Omega = 2\pi(1 - \sqrt{1 - r_{sun}^2 / r^2})$  – телесный угол солнечного диска, измеренный с расстояния  $r$ .  $r_{sun}$  – радиус Солнца. Для  $r \gg r_{sun}$  телесный угол  $\Omega = \pi r_{sun}^2 / r^2$ .  $F(\lambda)$  – реальное распределение энергии в солнечном спектре в единицах дж/(сек·м<sup>2</sup>·мкм·ср),  $E_{rad}$  – излучаемая энергия,  $B(\lambda, T)$  – распределение энергии в спектре излучения пылинки с температурой  $T$ . Для модельных расчетов в чернотельном приближении в этой и других формулах вместо  $F(\lambda)$  подставляется функция Планка с  $B(\lambda, T_{eff})$  с  $T_{eff} = 5779 \text{ К}$ .

Фактор  $Q_{abs}(\lambda, s, m)$  входит как в левую, так и в правую части равенства (1). Это означает, что эффективность поглощения падающего излучения на длине волны  $\lambda$  такая же, что и эффективность излучения на этой же длине волны.

Предположим теперь, что гранула представляет собой абсолютно черное тело, то есть  $Q_{abs} = 1$ . Для больших расстояний ( $r > 10r_{sun}$ ) из формулы (1) можно получить температуру пылинки в зависимости от расстояния до Солнца в приближении абсолютно черного тела:  $T = T_{eff}(r_{sun}/2r)^{1/2}$ . В результате численных расчетов получаются значения температур нагрева частиц в зависимости от материала, радиуса и расстояния до Солнца.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов температуры частиц на расстоянии  $10r_{sun}$  в зависимости от их радиусов  $s$ . Вызывает удивление, что вблизи радиусов частиц около 0.1 мкм их температуры могут превышать температуру черного тела. Такие результаты – следствие волновой природы света, когда эффективное сечение частиц превосходит геометрические размеры. На рисунке 2 показан ход температуры в зависимости от расстояния для частиц, размеры которых (рисунок 1) показывают самое сильное отклонение от чернотельного приближения. Характер зависимости не соответствует чернотельному закону:  $T \sim (1/r)^{1/2}$ . На близких расстояниях температура даже слабо поглощающих частиц р-обсидиана превосходит температуру черного тела.

Более низкие температуры нагрева пылевых частиц реальным Солнцем объясняются обилием в солнечном спектре линий поглощения в этом же диапазоне длин волн, где эффективный фактор поглощения  $Q_{abs}$  максимален для малых частиц. С увеличением размеров частиц температуры стремятся к чернотельным, эффекты дифракции убывают и сечение частиц может сводиться к геометрической оптике, то есть к тривиальному значению площади сечения:  $\pi s^2$ .

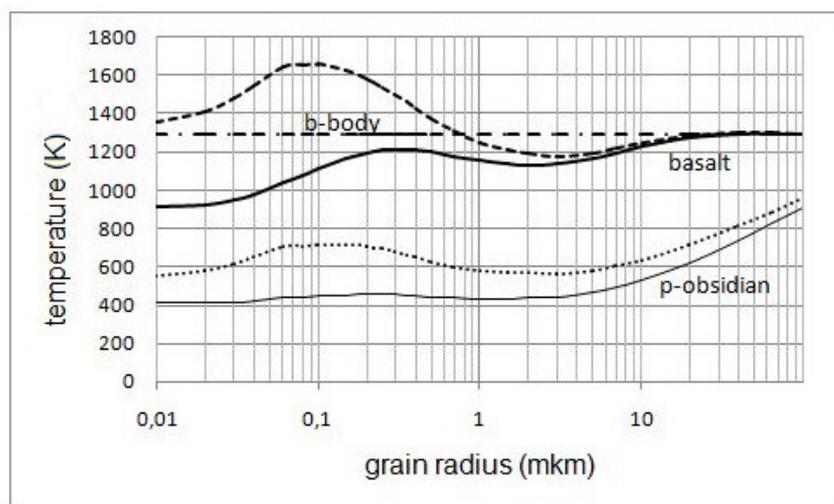


Рисунок 1 – Температуры частиц из базальта и р-обсидиана на расстоянии  $10r_{sun}$ .

Сплошные линии – реальное Солнце. Пунктирная и точечная кривые – расчеты для солнечного аналога с эффективной температурой  $T_{eff} = 5779K$ . Прямая b-body – черное тело

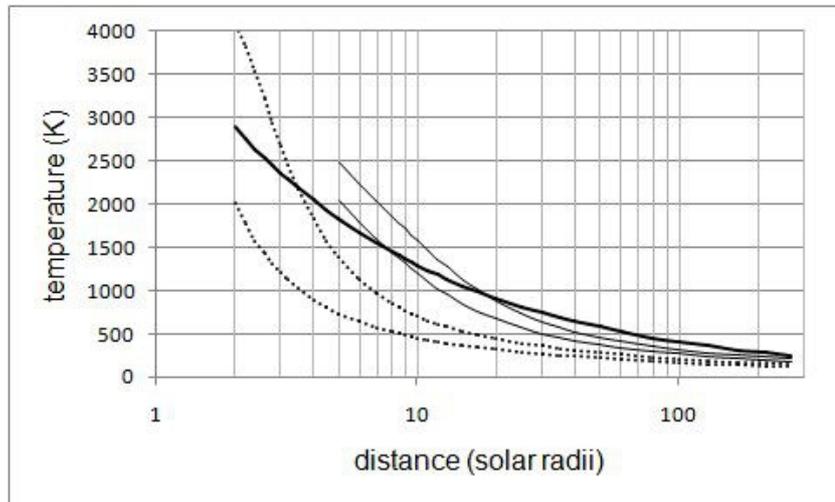


Рисунок 2 – Температура частиц радиусами 0.2 мкм в зависимости от расстояния до Солнца.

Жирная линия – абсолютно черное тело. Две тонкие линии – базальт, точечные линии – р-обсидиан.

В каждой паре нижняя кривая – реальное Солнце, верхняя кривая – солнечный аналог

**Расчеты светового давления.** Расчет среднего фактора радиационного давления  $Q_{pr} = \langle Q_{pre} \rangle$  и отношения силы давления к силе тяготения  $\beta = F_{pre}/F_{grav}$  проводится в зависимости от материала и радиуса пылинки. Эти параметры не зависят от расстояния до Солнца.

Расчетные формулы имеют вид:

$$Q_{pr}(s, m) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pre}(\lambda, s, m) \cdot F(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad \beta(s, m) = \frac{F_{pre}}{F_{grav}} = \frac{3 \cdot Q_{pr}(s, m) \cdot L_{sun}}{16\pi \cdot c \cdot \mu_{sun} \cdot \delta \cdot s}, \quad (2)$$

где  $Q_{pre}(\lambda, s, m)$  – эффективный спектральный фактор давления, рассчитанный по теории Ми,  $m = n + ik$  – комплексный индекс рефракции,  $F(\lambda)$  – излучение Солнца,  $L_{sun}$  – полная светимость Солнца,  $\mu_{sun} = \mu = G \cdot M$  – гравитационный параметр Солнца,  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса Солнца,  $c$  – скорость света,  $\delta$  – плотность вещества.

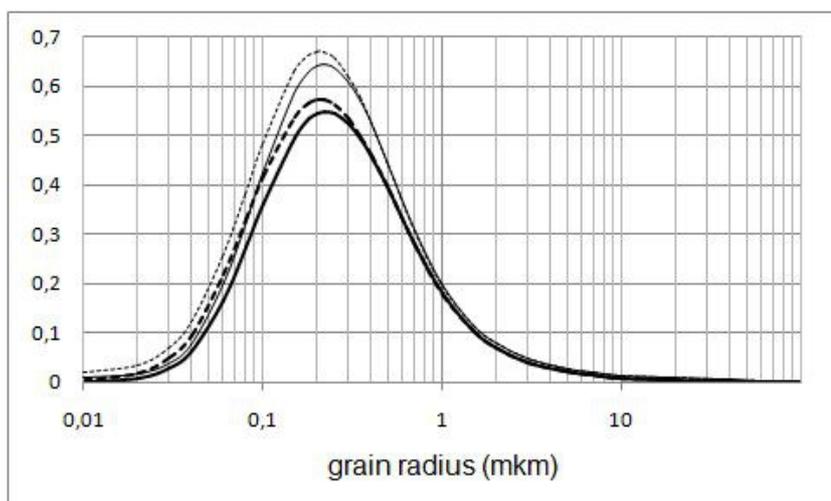


Рисунок 3 – Отношение давления радиации к силе тяготения  $\beta$  для частиц р-обсидиана (жирные линии) и базальта (тонкие линии). В каждой паре верхние штриховые линии – солнечный аналог, нижние сплошные – реальное солнце

Максимум светового давления приходится на частицы радиусами 0.2 мкм, которые сильнее других подвержены действию солнечной радиации.

**Алгоритм расчета орбитальной эволюции.** Расчет орбитальной эволюции пылевых частиц основан на численном интегрировании системы дифференциальных уравнений:

$$\ddot{r} = r\dot{\varphi}^2 - \frac{\mu}{r^2} \cdot \left( 1 - \beta - \beta' \cdot \frac{V_{wr} - \dot{r}}{U} \right) \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi} = -\frac{1}{r^2} \cdot \left[ 2r \cdot \dot{r}\dot{\varphi} + \alpha \cdot \dot{\varphi} \cdot \left( 1 + \frac{r_{sun}^2}{2r^2} \right) + \alpha' \cdot \left( \dot{\varphi} - \frac{V_{wr}}{r} \right) \right] \quad (4)$$

$$\dot{s} = \frac{0.0408}{\delta} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M_g}{T}} \quad (5)$$

Для вычисления давления насыщенных паров  $P$  служит формула [5, 6]:

$\lg(P) = 10.915 - 24928.3/T$ , где  $P$  выражено в торах (1 тор = 1 мм рт.ст.). В уравнении (5) давление  $P$  выражено в торах, а плотность  $\delta$  выражено в г/см<sup>3</sup>,  $\dot{s}$  в см/сек. Приняты следующие обозначения:

$\dot{r} = dr/dt$  – скорость изменения  $r$  со временем;  $\ddot{r} = d^2r/dt^2$  – ускорение;  $\varphi$  – угол поворота вектора  $\vec{r}$ ;  $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$  – угловая скорость изменения  $\varphi$  со временем;  $\ddot{\varphi} = d^2\varphi/dt^2$  – угловое ускорение;  $\dot{M}$  – потеря массы Солнца;  $\dot{s} = ds/dt$  – скорость изменения радиуса частицы  $s$  со временем;  $\alpha = \beta \cdot \mu/c$ ;  $\alpha' = \beta' \cdot \mu/U = 3\dot{M}/(16\pi \cdot s \cdot \delta) \cdot U/V_{wr}$ ;  $M_g$  – молекулярный вес материала частицы;  $V_{wr}$  – радиальная и  $V_{w\tau}$  – тангенциальная

составляющая скорости солнечного ветра;  $U = \sqrt{V_{wr}^2 + V_{w\tau}^2}$  – модуль скорости звездного ветра;  $\beta' = \frac{3\dot{M} \cdot U^2}{16\pi \cdot \mu \cdot s \cdot \delta \cdot V_{wr}}$  – аналог  $\beta$ , отношение силы давления солнечного ветра к силе гравитации.

**Результаты расчетов орбитальной эволюции.** Орбитальная эволюция частиц рассчитана для ряда начальных радиусов частиц  $s_0$  от 0.02 мкм до 100 мкм и различных стартовых расстояний  $r_0$  вблизи зоны сублимации. Предполагается, что частица срывается с родительского тела, двигаясь по круговой орбите. Испарение рассчитывалось до финального радиуса  $s_{fin}=0.01$  мкм, предельное удаление от Солнца, где расчет прерывается:  $r_{fin} = 270r_{sun}$ . Расчет проводился для реального излучения Солнца [10] и для распределения энергии в солнечном спектре согласно функции Планка с  $T=5779K$  (солнце-звезда).

Результаты представлены в таблицах 1 и 2 через дробь Солнце/звезда.

Таблица 1 – P-обсидиан. Солнце/звезда

Стартовый радиус	Конечный радиус	Стартовое расст.	Конечное расст.	Начальная темп.	Конечная темп.	Время	Число оборотов
$s_0$ (мкм)	$s_{fin}$ (мкм)	$r_0(r_{sun})$	$r_{fin}(r_{sun})$	$T_0(K)$	$T_{fin}(K)$	t(days)	$\varphi(n)$
0.02/0.02	0.01/0.01	3/5	2.33/3.88	1007/1042	1357/1273	3.1/9.3	6.06/8.2
0.1/0.1	0.01/0.01	4/6	2.18/3.59	868/1155	1472/1390	127.5/1.3	58.9/0.74
0.15/0.15	0.15/0.01	4/5	270/3.91	891/1415	119/1257	68.7/37.8	0.472/12.6
0.15/0.15	0.15/0.15	4/6	270/270	891/1153	119/150	68.7/33.7	0.472/0.403
0.2/0.2	0.01/0.01	2.5/4.8	2.27/3.82	1501/1462	1401/1294	6.7/10.2	4.14/8.06
0.2/0.2	0.184/0.182	2.6/5	270/270	1426/1385	119/150	25.9/26.3	0.411/0.38
0.3/0.3	0.3/0.3	4/5	270/270	893/1310	119/147	34.8/33.0	0.422/0.41
0.4/0.4	0.01/0.32	4/5	2.16/270	876/1228	1491/146	654/728	105.7/24.5
-/0.5	-/0.107	-/5	-/4.49	-/1171	-/1614	-/305	-/42
1.0/1.0	0.01/0.32	4/5	2.18/3.98	810/1048	1470/1820	217.9/216	215.1/126
10/10	0.01/0.486	4/5	2.18/3.84	1114/1145	1470/1691	1392/1648	1847/1454

Выводы по таблице 1.

1. Частицы в интервале радиусов от 0.15 и до 0.3 мкм покидают Солнечную систему, если они отрываются от родительских тел вне области сублимации. Для солнца-звезды этот интервал продлевается до 0.4 мкм.

2. Частицы как больших, так и меньших размеров испаряются при приближении к Солнцу.

3. Область полного испарения частиц для реального Солнца находится на расстоянии  $(2.1-2.3)r_{\text{sun}}$ , а для Солнца-звезды на расстоянии  $(3.6-4.5)r_{\text{sun}}$ .

4. Критические стартовые расстояния, вблизи которых «судьба» частиц резко изменяется, исследованы на примере частиц радиусами 0.2 мкм (рисунок 1). При старте с расстояния  $2.5r_{\text{sun}}$  частицы испаряются, а стартовые с  $2.6r_{\text{sun}}$  успевают вырваться из зоны сублимации наружу. Для солнца-звезды критические расстояния находятся дальше:  $4.8r_{\text{sun}}$  и  $5.0r_{\text{sun}}$  соответственно.

Таблица 2 – Базальт. Солнце/звезда

Стартовый радиус	Конечный радиус	Стартовое расст.	Конечное расст.	Начальная темп.	Конечная темп.	Время	Число оборотов
$s_0(\text{мкм})$	$s_{\text{fin}}(\text{мкм})$	$r_0(r_{\text{sun}})$	$r_{\text{fin}}(r_{\text{sun}})$	$T_0(\text{К})$	$T_{\text{fin}}(\text{К})$	$t(\text{days})$	$\varphi(n)$
0.02/0.02	0.01/0.01	9/13	7.06/11.08	1017/1118	1245/1237	33.8/51.7	12.41/9.88
-/0.05	-/0.01	-/14	-/11.03	-/1194	-/1242	-/196.8	-/270.1496
0.1/0.1	0.01/0.099	9/14	6.84/270	1220/1252	1283/211	458/84.5	40.1/0.464
0.15/0.15	0.149/0.15	9/14	270/270	1281/1230	181/210	30.7/31.4	0.36/0.33
0.2/0.2	0.123/0.155	8/12	270/270	1446/1366	179/210	55.6/29.0	0.435/0.33
0.2/0.2	0.01/0.01	7.5/11	6.74/10.66	1527/1468	1302/1281	14.5/3.8	4.9/0.84
0.5/0.5	0.44/0.40	9/13	270/270	1303/1120	185/201	614/4959	6.49/93.5
-/0.6	-/0.33	-/13	-/270	-/1090	-/203	-/2691	-/123.4
-/0.7	-/0.01	-/13	-/10.4	-/1067	-/1309	-/1973	-/154.4
1.0/1.0	0.42/0.20	8/13	270/9.72	1361/1021	185/1694	89.2/ 1884	5.45/258
1.0/1.0	0.01/0.01	7.5/12	6.79/10.42	1428/1087	1293/1308	23.8/1300	6.08/186.4
10.0/10.0	0.325/0.30	7.5/10	270/9.06	1456/1244	185/1728	152/2953	35.4/841

Выводы по таблице 2.

1. В случае реального Солнца все частицы радиусами от 0.15 мкм и больше покидают Солнечную систему, если они отрываются от родительских тел вне области сублимации. Частицы меньших размеров падают на Солнце.

2. Для солнца-звезды интервал «убегающих» частиц заключен между 0.15 и 0.6 мкм. Частицы как больших, так и меньших размеров испаряются в области сублимации.

3. Область полного испарения частиц для реального Солнца находится на расстоянии  $(6.7-7.1)r_{\text{sun}}$ , а для Солнца-звезды на расстоянии  $(9.0-11.1)r_{\text{sun}}$ .

5. Критические стартовые расстояния исследованы на примере частиц радиусами 0.2 мкм. При старте с расстояния  $7.5r_{\text{sun}}$  частицы испаряются, а стартовые с  $8.0r_{\text{sun}}$  успевают вырваться из зоны сублимации. Для солнца-звезды критические стартовые расстояния:  $11.0 r_{\text{sun}}$  и  $12.0r_{\text{sun}}$  соответ-ственно.

Принципиальное различие поведения базальтовых частиц от частиц р-обсидиана состоит в том, что при замене реального распределения энергии в спектре Солнца на энергетически эквива-лентное, представляемое функцией Планка с  $T = 5779\text{K}$  (солнце-звезда), «судьба» частиц изме-няется. Все крупные частицы радиусами  $s \geq 0.15$  мкм покидают солнечную систему под действием светового давления реального Солнца. Зона сублимации около солнца-звезды располагается на более далеком расстоянии и имеет большую ширину. При увеличении расстояния скорость орбитального движения становится меньше и, по-видимому, частицы не успевают вылететь из более широкой «горячей» зоны и полностью испаряются.

Расчеты для базальта, выполненные с  $\delta = 2.7 \text{ г/см}^3$ , результатов практически не меняют. Основное отличие состоит в том, что радиус «убегающих» частиц для солнца-звезды ограни-чивается сверху величиной 0.5 мкм вместо 0.6 мкм.

На рисунках 4 и 5 приведены примеры орбитальной эволюции частиц, стартовых с круговых орбит. На рисунке 4 продемонстрировано поведение р-обсидиановых частиц в зависимости от стартового расстояния вблизи зоны сублимации. Частица с исходным радиусом 0.2 мкм после старта на  $2.5r_{\text{sun}}$  вылетает на высокоэллиптическую орбиту до  $\approx 17r_{\text{sun}}$ , затем, после 3-х оборотов вблизи стартового расстояния, полностью испаряется. Такая же частица, оторвавшаяся от роди-тельского тела с круговой орбиты на расстоянии  $2.6r_{\text{sun}}$ , сразу удаляется из околосолнечной области, не сделав ни одного оборота.

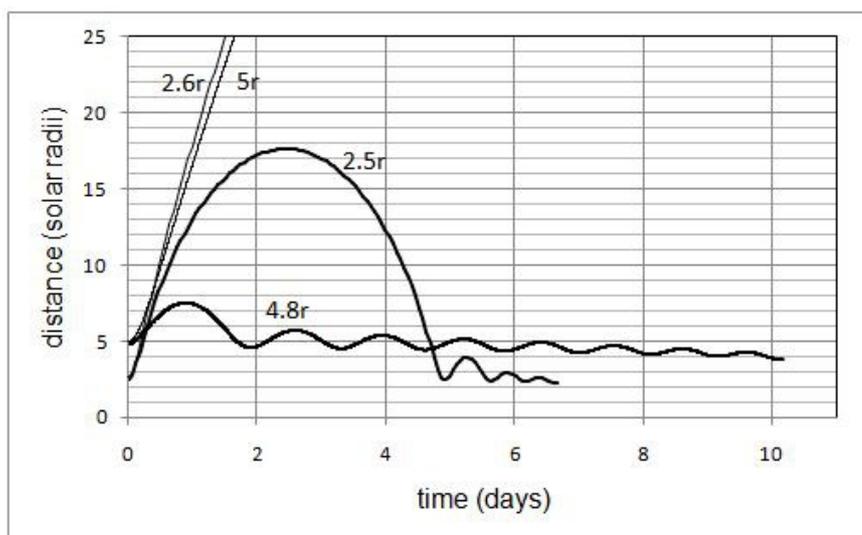


Рисунок 4 – Орбитальная эволюция р-обсидиановых частиц радиусом 0.2 мкм. Около кривых указаны

стартовые расстояния в солнечных радиусах: 2.5r и 2.6r – реальное Солнце, 4.8r и 5r –  
солнце-звезда.

Жирные линии – частицы испаряются, тонкие линии – частицы улетают

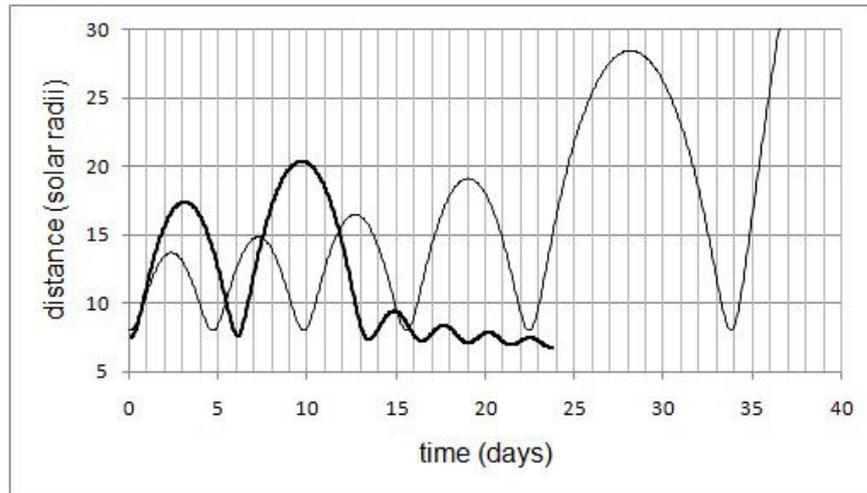


Рисунок 5 – Орбитальная эволюция базальтовых частиц радиусом 1 мкм для реального Солнца.

Жирная кривая – старт с  $7.5 r_{\text{sun}}$ , частица испаряется. Тонкая линия – старт с  $8 r_{\text{sun}}$ , частица улетает

На рисунке 5 показана орбитальная эволюция базальтовых частиц с исходным радиусом 1 мкм вблизи зоны сублимации реального Солнца. После выхода на высокоэллиптическую орбиту частица либо полностью испаряется при старте с  $4.8r_{\text{sun}}$ , либо покидает околосолнечную область, если стартует на расстоянии  $5r_{\text{sun}}$ .

Частицы, срывающиеся с кометных тел, то есть такие, которые движутся по параболическим орбитам, покидают солнечную систему независимо от их размеров, если стартовое расстояние для них превышает радиус зоны сублимации.

#### **Заключительные замечания.**

1. Орбитальная эволюция пылевых частиц вблизи области сублимации сильно зависит от материала частиц и принятой модели распределения энергии в спектре источника (Солнца, звезды). Так, «судьба» базальтовых частиц меняется в зависимости от модели. Все крупные частицы радиусами  $s \geq 0.15$  мкм покидают солнечную систему под действием светового давления реального Солнца, а около Солнца – звезды частицы радиусами  $s \geq 0.6$  мкм полностью испаряются.

4. Для реального Солнца граница полного испарения пылевых частиц из вулканического стекла (р-обсидиана) находится на расстоянии  $r = (2.1-2.3)r_{\text{sun}}$ . Для Солнца – звезды с Планковским распределением энергии в спектре ( $T_{\text{eff}} = 5779\text{K}$ ) эта

граница находится значительно дальше:  $r \approx 3.6-4.5 r_{\text{sun}}$ . Базальтовые частицы испаряются на расстояниях  $(6.7-7.1)r_{\text{sun}}$  и  $(9.0-11.1)r_{\text{sun}}$  соответственно.

2. Частицы астероидного происхождения или срывающиеся с крупных метеороидов, движущихся по круговым орбитам, по мере испарения могут выходить на высокоэллиптические орбиты до  $r \approx 50 r_{\text{sun}}$ .

3. Частицы с радиусами, близкими к максимуму светового давления ( $s = 0.15-0.4$  мкм), покидают солнечную систему даже с круговых начальных орбит.

4. Частицы, размеры которых меньше 0.15 мкм, приближаются к Солнцу по спирали в соответствии с законом торможения Пойнтинга-Робертсона без выхода на высокоэллиптические орбиты. В этом случае, когда световое давление падает, возрастает роль давления солнечного ветра.

5. Кометные частицы, срывающиеся с квази-параболической орбиты за пределами зоны испарения, покидают солнечную систему.

Основной вывод, вытекающий из сравнения орбитальной эволюции пылевых частиц для реального Солнца и солнца-звезды следующий: аппроксимация спектра звезды функцией Планка приемлема лишь для частиц со слабыми абсорбционными свойствами типа вулканического стекла, для сильно поглощающих пылевых частиц такое приближение следует применять с осторожностью.

*Работа выполнена по проекту грантового финансирования 0174/ГФ Комитета науки МОН РК.*

## ЛИТЕРАТУРА

1 Lena P., Hall D., Soufflot A., Viala Y. The thermal emission of the dust corona, during the eclipse of June 30, 1973. II – Photometric and spectral observations // *Astron. Astrophys.* – 1974. – Vol. 37. – P. 81-86.

2 [Reach W.T.](#), [Franz B.A.](#), [Weiland J.L.](#) The Three-Dimensional Structure of the Zodiacal Dust Bands // *Icarus.* – 1997. – Vol. 127. – P. 461-484.

3 [Kelsall T.](#) et al. The COBE Diffuse Infrared Background Experiment Search for the Cosmic Infrared Background: II. Model of the Interplanetary Dust Cloud // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 508. – P. 44-73.

4 Roser S., Staude H.J. The Zodiacal light from 1500 °A to 60 micron // *Astron. Astrophys.* – 1978. – Vol. 67. – P. 381-394.

5 Lamy P.L. The Dynamics of Circum-solar Dust Grains // *Astron. Astrophys.* – 1974a. – Vol. 33. – P. 191-194.

6 Lamy P.L. Interaction of interplanetary dust grains with the solar radiation field // *Astron. Astrophys.* – 1974b. – Vol. 35. – P. 197-207.

7 Mikai T., Yamamoto T., Hasegawa A., Fujiwara A., Koike C. On the circumsolar grain materials // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* – 1974. – Vol. 26. – P. 445-458.

8 Mikai T., Yamamoto T. A Model of the Circumsolar Dust Cloud // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* – 1979. – Vol. 31. – P. 585-596.

9 Lamy P.L., Perrin J.-M. Circumstellar grains: radiation pressure and temperature distribution // *Astron. Astrophys.* – 1997. – Vol. 327. – P. 1147-1154.

- 10 Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. – М.: Наука, 1991. – 401 с.
- 11 Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. – 664 с.
- 12 Masafumi M., Munezo S. Polarization Efficiency and Phase Function, Calculated on the Basis of the Mie Theory // The Science Reports of the Tohoku University, Eighth Series. – 1985. – Vol. 6, №.1. – P. 11-48.
- 13 Lamy P.L. Optical properties of silicates in the far ultraviolet // *Icarus*. 1978. – Vol. 34. – P. 68-75.
- 14 Pollack J.B., Toon O.B., Khare B.N. Optical properties of some terrestrial rocks and glasses // *Icarus*. – 1973. – Vol. 19. – P. 372-389.
- 15 Веселовский И.С. Солнечный ветер и гелиосферномагнитное поле. Модель космоса. Научно-информационное издание / Ред. Панасюк М.И., Новикова Л.С. – Т. 1. – Физические условия в космическом пространстве. – М.: КДУ, 2007. – С. 314-359.

## REFERENCES

- 1 Lena P., Hall D. Soufflot A., Viala Y. *Astron. Astrophys.*, **1974**, 37, 81-86.
- 2 [Reach W. T.](#), [Franz B. A.](#), [Weiland J. L.](#) *Icarus*, **1997**, 127, 461-484.
- 3 [Kelsall T.](#) et al. *Astrophys. J.*, **1998**, 508, 44-73.
- 4 Roser, S. and Staude, H.J. *Astron. Astrophys.*, **1978**, 67, 381-394.
- 5 Lamy, P.L. *Astron. Astrophys.*, **1974a**, 33, 191-194.
- 6 Lamy, P.L. *Astron. Astrophys.*, **1974b.**, 35, 197-207.
- 7 Mikai, T., Yamamoto, T., Hasegawa, A., Fujiwara, A., and Koike, C. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **1974**, 26, 445-458.
- 8 Mikai, T. and Yamamoto, T. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **1979**, 31, 585-596.
- 9 Lamy, P.L., Perrin, J.-M. *Astron. Astrophys.*, **1997**, 327, 1147-1154.
- 10 Makarova E.A., Kharitonov A.V. Kazachevskaja T.V. *Potok solnechnogo izluchenija*. **1991**, Moscow, Nauka, 401 (in Russ.).
- 11 Boren C.F, Hafmen D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, **1983**, John Wiley & Sons, Inc., 664.
- 12 Matsumura M., Seki M. *Polarization Efficiency and Phase Function Calculated on the Basis of the Mie Theory*. Faculty of Science, Tohoku University, SENDAL, JAPAN. Eighth Series, **1985**, 6, 11-48.
- 13 Lamy P.L. *Icarus*, **1978**, 34, 68-75.
- 14 Pollack J.B., Toon O.B. and Khare B.N. *Icarus*, **1973**, 19, 372-389.
- 15 Veselovskij I.S. Eds. Panasjuk M.I., Novikova L.S. *Fizicheskie uslovija v kosmicheskom prostranstve*. Moscow: KDU, **2007**, 1, 314–359 (in Russ.).

## Резюме

*Л. И. Шестакова, Б. И. Демченко*

(«Фесенков атындағы Астрофизика институты» ЕЖШС, Алматы, Қазақстан Республикасы)

## КҮН ТӘРІЗДІ ЖҰЛДЫЗДЫҢ МАҢЫНДА СУБЛИМАЦИЯЛАНУ АЙМАҒЫНДА ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ОРБИТАЛЫҚ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

*Мақсат.* Булану процесі кезіндегі жанартаулы әйнектің және базальттан тұратын силикатты тозаңды бөлшектердің орбиталық эволюциясын зерттеу. Күннің және жұлдыздардың спектрлерінде шынайы энергияның таралу нәтижелерін салыстыру үшін –  $T_{\text{eff}} = 5779\text{K}$  Планк функциясына сәйкес Күнге ұқсас жұлдыздардың спектрлерінде энергияның таралуы.

*Зерттеу әдісі.* Сандық модельдеу. Тозаңды бөлшектердің температураларын есептеу, Күннен қашық-тығы және өлшемі, олардың заттарына сәйкес жылу алмасу теңдеуінің шешіміне негізделген. Біртекті сфералық бөлшектер үшін Ми теориясы қолданылды. Рефракциялары әртүрлі көрсеткішті силикаттың екі түрі таңдап алынды: орташа абсорбциялы қасиетті базальт және жарықты аз жұтатын (p-обсидиан) жанартаулы әйнек. Сәулелену қысымының және күн желінің әсері, сонымен бірге, тозаңның динамикасына Пойнтинг-Робертсонның тежелу әсері ескерілді.

*Қолдану аймағы.* Газ-тозаңды дискалы күн тәрізді жұлдыздар эволюциясы

*Нәтижелер және тұжырымдар.* Тозаңның температуралық тәртібі, абсолютті қара дененің тәртібінен ерекшелінеді және олар тұратын заттарынан және бөлшектерінің өлшеміне аса тәуелді болады. 2.2 күн радиусына дейінгі арақашықтықта, күн маңындағы тозаң қатты бөлшектер түріндегі бұлттар тәрізді өмір сүре алмайды, себебі күннің сәулесімен қызу дәрежесі барлық түрдегі силикаттардың еру температурасынан асатындығы көрсетілген. Максимальды температураға ие бөлшектер, шамамен 0.05-0.5 мкм аралықтарындағы өлшемдегі радиустарға ие. Бөлшектердің өлшемі және заттардың түрлері бойынша, сәулелену қысымы тозаңдарға күшті селективті әсер туғызады 0.15-0.3 мкм радиусты бөлшектер максималды сәулелену қысымын сезе алады.

1.5-2 есе алыс күнге ұқсастар үшін қарастырылған силикаттардың сублимациялану аймағының шекарасы, шанайы Күнге қарағанда, Күннің спектрінде энергияның таралуы қабылданған модельдің нәтижелеріне күшті тәуелді болатындығының дәлелі алынды. Модельге тәуелсіз, 0.15-0.4 мкм радиустағы обсидиалы бөлшектер, ата-аналық денеден қол үзгеннен кейін Күн жүйесінен кетеді. Базальтты бөлшектер үшін модельдік тәуелділік шекараның ығысуы түріндегі толық булануы кезінде ғана емес, тіпті бөлшектің «тағдырының» соңында да байқалады. Радиусы 0,15-0,5 мкм болатын базальтты бөлшектер Күн-жұлдыз моделі кезінде p-обсидиан бөлшектері тәрізді, Күн жүйесінен кетеді, қалған бөлшектер толық дерлік буланып кетеді. Шынайы Күн моделінде 0.15 мкм үлкендеу радиусты базальтты бөлшектер Күн жүйесін тастап кетеді. Жанартаулы әйнекті түріндегі әлсіз абсорбциялы қасиеттегі бөлшектер үшін тек қана Планк

функциясымен жұлдыз-дардың спектрлерін жуықтау жарамды, ал қатты жұтылатын тозаңды бөлшектер үшін ондай жуықтауларды абайлап қолдану қажет.

**Тірек сөздер:** тозаңды бөлшектер, орбиталық эволюция, тозаңның сублимациялануы, күн тәрізді жұл-дыздар, жұлдыз маңындағы дөңгелек (дискі).

## Summary

*L. I. Shestakova, B. I. Demchenko*

(D TOO «Fesenkov Astrophysical Institute», Almaty, Republic of Kazakhstan)

### ORBITAL EVOLUTION OF DUST PARTICLES

#### IN THE FIELD OF SUBLIMATION NEAR SOLAR-TYPE STARS

*Aims.* The study of the orbital evolution of silicate dust grains of basalt and volcanic glass in the process of evaporation. Comparison of results for the Sun with the actual spectral energy distribution and for the stars – a solar analogue with the model distribution according to the Planck function with  $T_{\text{eff}} = 5779\text{K}$ .

*Methods.* Numerical simulation. Calculations of temperature of dust particles are based on the solutions of the equation of thermal balance according to their material, size, and distance from the Sun. The theory of Mie for homogeneous spherical particles was used. Two types of silicates with different refractive indices are selected: basalt with middle absorption properties and volcanic glass weakly absorbing light (p-obsidian). The influence of radiation pressure and solar wind, and the deceleration action of the Poynting-Robertson effect on the dynamics of dust was taken into account.

*Field of application.* Evolution of solar- type stars with gas and dust disks.

*Results and conclusions.* Temperature dust mode differs from a blackbody, and is highly dependent on the particle size and the material of which they consist. Found that up to distances of 2.2 solar radii, circumsolar dust in the form of a cloud of particles cannot exist, because its heat by solar radiation is very strong and temperature of grains above melting point of all silicates. Maximum temperature have particles of intermediate sizes with radii approximately 0.05-0.5  $\mu\text{m}$ .

Radiation pressure has a strong selective influence on the dust particle according to the particle size and the type of material. Maximum pressures of radiation have particles with radii of 0.15-0.3  $\mu\text{m}$ .

It was found that the boundary of the sublimation of silicates examined for a solar analogue 1.5-2 times farther than for the real sun, indicating a strong dependence of the results on the adopted model of the energy distribution in the spectrum of the Sun.

Regardless of the model, obsidian particles with radii of 0.15-0.4  $\mu\text{m}$  leave the solar system after the separation from the parent body, the remaining particles evaporate completely.

Model dependence of basalt particles is evident not only as a shift of the boundary complete evaporation, and even in the final "fate" of the particles. Basalt particles with radii of 0.15-0.5 mkm in the model of the Sun-star leave the solar system, as well as particle p-obsidian, remaining particles evaporate completely. In the model of the real sun, all basalt particles of radii larger 0.15 mkm leave the solar system.

Approximation of the spectrum of a star by the Planck function is only acceptable for particles with weak absorption properties such as volcanic glass, for strongly absorbing dust particles, this approximation should be used with caution.

**Keywords:** dust grains, orbital evolution, dust grain sublimation, solar type stars, circumstellar disk.

*Поступила 2.09.2013г.*