

УДК 536.3

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-384-398

EDN: OTIHND

PACS: 44.40.+a, 42.68Ay, 42.72.g



Воздействие солнечного излучения на пыль в околоземном пространстве

А. Н. Свиридов, Л. Д. Сагинов

Проведены расчеты температур частиц пыли (на примере углеродных частиц), нагреваемых солнечным и земным излучением, на высотах 65–100 км. Показано, что частицы достигают температур, при которых начинается видимое свечение ($T > 900$ К) при высотах, превышающих 70 км. Максимальная температура частиц ($T = 2385$ К) и максимальная интенсивность свето-синего свечения достигается на высоте 85 км. Показано, что на этой высоте минимальную температуру имеют частицы с размерами 10 мкм и более. Их температура не зависит от размера и оценивается величиной 300 К. Температура частиц с размерами меньшими 10 мкм увеличивается при уменьшении их размеров. Углеродные частицы с размерами меньшими 2×10^{-7} м нагреваются до температур 2385 К, сублимируются и в конечном итоге перестают существовать. Излучения скоплений подобных частиц на фоне темного неба в предрассветное или послезакатное время может представляться наблюдателям в виде светящихся облаков – Серебристых облаков. Пылинки из других материалов сублимируются при меньших температурах и, следовательно, солнечное излучение приводит к выжиганию подобных пылинок, находящихся в околоземном пространстве не только с субмикронными, но и с микронными размерами. На основе проведенных расчетов и анализа литературных данных в работе формулируется следующая гипотеза о природе серебристых облаков: Серебристые облака представляют собой скопления раскаленных наночастиц.

Ключевые слова: закон Планка, закон Стефана-Больцмана, закон смещения Вина, закон Кирхгофа, дифракция, плотность потока излучения, коэффициент излучения, коэффициент поглощения, пространственная спектральная мода, энергия моды, сублимация, формула Кнудсена–Ленгмюра, термоэмиссия, межпланетная пыль, субволновые частицы, серебристые облака, мезосферные облака.

Введение

Известно, что в атмосферу Земли из межпланетного пространства влетает множество

микрометеороидов (размер 25–1000 мкм) и метеороидов (размер от 1000 мкм до нескольких метров). Их наиболее вероятные скорости 14–24 км/с. В результате ежегодно на поверхность Земли выпадает (по разным оценкам) от 4 до 150 тыс. тонн космического вещества [1–5]. На высотах 80–130 км входящие в атмосферу метеорные тела претерпевают процесс абляции – дробления, испарения и распыления. Предполагается, что испарившееся метеорное вещество в верхней атмосфере частично реконденсируется, образуя частицы нанометрового размера – метеорную пыль или дымку.

В земную атмосферу также поступают частицы межпланетной и межзвездной пыли с

Свиридов Анатолий Николаевич, научный консультант, к.ф.-м.н.

E-mail: sviridtoly@yandex.ru

Сагинов Леонид Дмитриевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: lsaginov@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Россия, 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023

Принята к публикации 6.10.2023

© Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д., 2023

размерами от 0,1 мкм до 25–40 мкм [1]. Это крошечные твердые частицы из соединений углерода и кремния, похожие на мельчайший песок. При входе в атмосферу Земли подобные частицы в результате столкновений с молекулами воздуха быстро замедляются (на высотах ~ 100 км) от своих начальных скоростей входа > 10 км/с до тепловых скоростей, затем они медленно опускаются в атмосферу со скоростью оседания порядка см/с [6].

Пылинки с размерами меньшими 0,1 мкм «выметаются» из Солнечной системы давлением солнечного ветра. Более тяжелые и крупные частицы притягиваются Солнцем. Это так называемый эффект Пойнтинга–Робертсона. Солнечный свет, облучающий частицу межзвездной пыли, уменьшает ее момент, и частица начинает падать на Солнце. Хотя пылевые частицы, как правило, и состоят из тугоплавких материалов, при приближении к Солнцу важным становится процесс радиационной сублимации. Он происходит на разных расстояниях от Солнца для частиц различных размеров, что обусловлено сильной зависимостью температуры частицы от ее размера. Например, оценочное время жизни частицы размером 2 мкм составляет около 2000 лет [4]. Расчеты показывают, что вся пыль, заключенная внутри сферы радиусом в 1 А.Е. (астрономическая единица, равная большой полуоси земной орбиты), «выпадает» на Солнце за время порядка 100 тыс. лет. Источником разных частиц, заполняющих Солнечную систему, служат разрушающиеся ядра комет и столкновения тел в поясе астероидов [1–5].

Метеороиды и частицы межпланетной и межзвездной пыли, попадающие в околоземное пространство, воздействуют на космическую технику, оказывают влияние на связь и объекты биосферы. Наличие метеорного вещества в околоземном пространстве является одним из возможных экологических факторов, влияющим на глобальную температуру Земли. Поэтому их изучение представляет научный и практический интерес. Проблема метеороидов микронного размера представляет интерес также в связи с вопросом о выживаемости органического и биологического материала при его падении на поверхность Земли. Большая часть из космического материала, падающего на верхнюю часть земной

атмосферы в день, приходится на частицы с размерами от 10 мкм до 1000 мкм [6–9].

Пылевая материя, присутствующая в межпланетной среде, вызывает оптические явления – такие, как зодиакальный свет, фразунгоферова корона, противосияние, зодиакальная составляющая свечения ночного неба. Их исследование предоставляет сведения о природе и свойствах пылевых частиц. На основе изучения зодиакального света установлено, что концентрация пыли вблизи орбиты Земли составляет всего несколько частиц на кубический километр. Интенсивность рассеянного ими света практически не зависит от длины волны, а значит, по сравнению с ней, размер частиц должен быть достаточно велик (порядка нескольких микрон) [10].

В [6, 7, 11, 12] приведены данные оценочных расчетов температур нагреваемых Солнцем различных межпланетных пылинок, находящихся вне земной атмосферы (на высоте около 1000 км от поверхности Земли), т. е. на расстоянии 1 А.Е. от Солнца. На основании этих расчетов делались заключения о «выживаемости» разных частиц. По оценкам [12] средние температуры пылинок находятся в пределах 255–300 К.

В [6] оценки проводились для трех групп частиц (причем во всех случаях предполагалось, что закон Кирхгофа справедлив как для «больших тел», так и для СЧ-субволновых частиц¹):

1) для частиц, диаметры которых превышают длины волн поглощенного или испущенного излучения, $D > 20$ мкм («большие тела»);

2) для частиц, диаметры которых сравнимы с длинами волн поглощенного или испущенного излучения, $0,02$ мкм $< D < 20$ мкм (область рассеивания Ми);

3) для частиц, у которых $\pi \cdot D \ll \lambda$ на всех соответствующих длинах волн (асимптотический предел Релея).

В первом случае считалось, что частица является черным телом и ее эффективность

¹ Под субволновой частицей будем понимать частицу, геометрические размеры которой соизмеримы с λ_{\max} – длиной волны, соответствующей максимальной интенсивности излучения черного (серого) тела, нагретого до температуры T ; $\lambda_{\max} = B/T$, где B – постоянная формулы смещения Вина.

поглощения Q_{abs} равна 1 ($Q_{abs} = 1$). Равновесная температура подобной частицы оценивалась величиной 289 K.

Во втором случае расчеты проводились по методике Ми. Было показано, что мелкие частицы менее эффективны в испускании инфракрасного излучения, чем в поглощении видимого света и поэтому имеют более высокую равновесную температуру, чем крупные.

В третьем случае Q_{abs} аппроксимировали с помощью асимптотического приближения [11–13]:

$$Q_{abs} \approx -\frac{8\pi D}{2\lambda} \operatorname{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (1)$$

где m – комплексный показатель преломления; $m = n - ik$.

Для упрощения предполагалось, что частицы излучают как серые тела и их показатель преломления не зависит от длины волны и равен $m = 1,4 - 0,1i$. Для этого случая была рассчитана равновесная температура частиц равная 530 K и сделаны следующие выводы:

– Температуры выше 500 K, рассчитанные для небольших идеальных зерен серого тела, позволяют предположить, что маленькие частицы с радиусами менее 10 мкм, если они состоят из летучих льдов или органических веществ, вряд ли выживут в свободном пространстве на солнечных расстояниях 1 А.Е. и менее.

– Летучие органические вещества, содержащиеся в гетерогенных сферах с радиусами ≥ 10 мкм, состоящие из смеси льда, углеродистого и органического вещества, имеют равновесные температуры ~ 290 K и способны выживать на расстояниях 1 А.Е. и более.

Из приведенного краткого цитирования сведений из литературных источников можно предполагать, что в околосолнечном пространстве на расстояниях равных радиусу орбиты Земли присутствуют в основном пылинки с размерами порядка микрона и более. Причем, чем меньше размер пылинок, тем выше их температура.

В [14] было показано, что для изолированной субволновой частицы (диаметр которой существенно меньше λ_{\max}), помещенной в безвоздушное пространство и находящейся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, коэффициент излучения может

быть меньше коэффициента поглощения. В похожих условиях находятся частицы на расстояниях от поверхности Земли около 85 км и более. Эти частицы находятся практически в безвоздушном пространстве и днем подвергаются излучению Солнца и Земли, а ночью – излучению Земли. Межпланетные пылинки имеют разный и сложный состав. Элементный состав пылевых частиц естественного происхождения в земной магнитосфере и микрометеороидов часто похож на состав углеродистых метеоритов хондритных классов и включает в себя такие элементы, как Mg, Al, Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni. Вместе с тем часто встречаются среди частиц межпланетной пыли и оливиновые частицы (силикаты железа и магния) [4–6]. В качестве объекта для дальнейших расчетов выберем углерод, так как он относится к одной из двух основных групп пылинок: аморфного углерода и силикатов и так как для него известны исходные данные [15].

Проведем расчеты температур подобных частиц по методике, разработанной в [14]. При этом будем исходить из представления о термодинамическом равновесии, т. е. о равенстве энергии, получаемой СЧ от Солнца и Земли и энергии, которую теряет СЧ вследствие излучения, сублимации и столкновений с молекулами.

Расчет мощности, излучаемой СЧ

Для расчета теплового потока, излучаемого СЧ в условиях термодинамического равновесия, используем результаты работ [14, 16, 17]. В этих работах для расчета собственных тепловых потоков СЧ использовался формализм модовой² теории излучений [18, 19]. Такой подход позволяет естественным образом учитывать дифракционные эффекты. Мы исходили из представления о том, что тепловое излучение частицы, распространяющееся в свободном пространстве в телесном угле Ω в виде полихроматического пучка сечением S_{csa} в его основании (т. е. S_{csa} равно

² Под пространственной спектральной модой (типом колебаний) понимают ТЕМ волну с заданными частотой ν , волновым вектором k , и поляризацией ρ_e , где ρ_e – единичный вектор поляризации; e – индекс, принимающий только два значения: $e = 1$ или 2 [18, 19].

поперечному сечению частицы), можно представить набором монохроматических лучей (пространственных спектральных мод), число которых $M(\lambda_m)$ для любой длины волны λ_m этого пучка равно [19]:

$$M(\lambda_m) = (\Omega \times S_{csa}) / \lambda_m^2. \quad (2)$$

Причем для каждой пространственно-спектральной моды (монохроматического луча с длиной волны λ_m) справедливо следующее соотношение:

$$S_m \times \Omega_m = \lambda_m^2 \quad (3)$$

где S_m – площадь минимального сечения монохроматического луча; Ω_m – телесный угол, в котором распространяется этот луч.

Выполнение равенства (2) является необходимым условием распространения любой пространственной моды с длиной волны λ_m этого пучка в свободном пространстве. При $M(\lambda_m) = 1$ в пучке, излучаемом частицей, будут отсутствовать лучи (моды) с длинами волн большими λ_m , т. к. они не могут распространяться в свободном пространстве (дальней зоне). Поэтому обозначим λ_m как длину волны отсечки λ_{cutoff} . В случае сферической частицы диаметром D этому условию будет соответствовать длина волны отсечки³ $\lambda_{\text{cutoff}} = 2,221 \times D$ [16].

Приведем основные соотношения, применяемые в дальнейших расчетах, в которых используются следующие обозначения (размерность в СИ):

h , k , σ , c – соответственно, постоянные Планка, Больцмана, Стефана–Больцмана и скорость света; λ , ν , T – соответственно, длина волны, частота излучения и температура.

$\Phi_{bb}(T)$ – мощность излучения черного тела на единицу площади излучающей поверхности в интервале частот от 0 до ∞ :

$$\Phi_{bb}(T) = \sigma T^4 \quad (4)$$

³ λ_{cutoff} – максимальная длина волны, которую может излучить сферическая частица диаметром D в свободное пространство.

$Po(\nu, T)$ – энергия одной пространственной моды с частотой ν , излучаемой черным телом с температурой T [18, 19]:

$$Po(\nu, T) = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad (5)$$

$\Psi_1(D, T)$ – энергия излучения полусферы СЧ на частоте ν может быть рассчитана путем произведения числа мод $M_1(\nu, D)$, излучаемых полусферой СЧ в телесном угле $\Omega = 2\pi$ (в виде пучка с площадью поперечного сечения $S_{csa} = \pi D^2/4$), на энергию каждой моды $Po(\nu, T)$.

$$\Psi_1(D, T) = 2Po(\nu, T) \times M_1(\nu, D) \quad (6)$$

$$\text{где } M_1(D) = \begin{cases} \frac{S_{csa} \Omega \nu^2}{c^2} \text{ if } \frac{S_{csa} \Omega \nu^2}{c^2} \geq 1 \\ 0 \text{ if } \frac{S_{csa} \Omega \nu^2}{c^2} < 1 \end{cases} \quad (7)$$

Множитель 2 в формуле (6) учитывает две возможные поляризации мод.

$\Phi_1(D, T)$ – мощность, излучаемую поверхностью сферы частицы, рассчитывали по следующему выражению:

$$\Phi_1(D, T) = 2\varepsilon_i \times \int_{\nu_1}^{\nu_2} \Psi_1(D, T) d\nu \quad (8)$$

где $\nu_1 = 1 \times 10^{12}$ Гц, $\nu_2 = 3 \times 10^{16}$ Гц; ε_i – интегральный коэффициент излучения вещества массивного тела.

Множитель 2 в формуле (8) учитывает излучение с поверхности двух полусфер СЧ.

Расчет мощности, поглощаемой СЧ от Солнца

Субволновую частицу, поглощающую энергию облучающих ее солнечных мод (ТЕМ электромагнитных волн), можно рассматривать как антенну, в которой под действием электрических и магнитных полей облучающих мод возбуждаются токи проводимости и (или) смещения, которые приводят к нагреву частицы.

В отличие от предыдущего случая, когда при расчете интегральной мощности, излу-

чаемой в свободное пространство поверхностью СЧ, мы не учитывали энергию мод с $\lambda > \lambda_{\text{cutoff}}$ (ввиду их отсутствия), при расчете интегральной мощности, поглощаемой СЧ, мы будем учитывать вклад всех мод, облучающих СЧ, в том числе и долей мод с $\lambda > \lambda_{\text{cutoff}}$, в соответствии с ε_i – интегральным коэффициентом поглощения «большого» тела из материала аналогичного материалу СЧ.

(Например, для графита $\varepsilon_i = 0,74\text{--}0,78$ при $T = 400\text{--}2400\text{ K}$, для угольной сажи $\varepsilon_i = 0,76\text{--}0,96$ при $T = 120\text{--}300\text{ K}$ [20]).

С учетом пояснений, приведенных выше, запишем выражение для $M_{SP}(D)$ – эффективного числа солнечных мод, облучающих полусферу графитовой СЧ, находящуюся от Солнца на расстоянии $L = 1\text{ А.Е.}$

$$M_{SP}(D) = \frac{\pi^2 D^2 D_S^2}{16L^2 \left(\frac{c}{v}\right)^2},$$

где D_S – диаметр Солнца (9).

Пусть $\Psi_{2SP}(D, T_S)$ – энергия солнечных мод, облучающих поверхность полусферы графитовой частицы.

$$\Psi_{2SP}(D, T_S) = 2P_0(v, T_S) \times M_{SP}(D) \quad (10)$$

где $P_0(v, T_S) = \frac{hv}{\exp\left(\frac{hv}{kT_S}\right) - 1}$, а T_S – температура поверхности Солнца.

Множитель 2 в формуле (10) учитывает две возможные поляризации мод.

Рассчитаем $\Phi_{2SP}(D, T_S)$ – мощность, поглощаемую половиной сферической поверхности этой частицы.

$$\Phi_{2SP}(D, T_S) = \varepsilon_i \times \int_{v_1}^{v_2} \Psi_{2SP}(D, T_S) dv, \quad (11)$$

где $v_1 = 1 \times 10^{12}\text{ Гц}$, $v_2 = 6 \times 10^{16}\text{ Гц}$.

Расчет мощности, поглощаемой СЧ от поверхности Земли

Так же, как в случае нагрева частиц солнечным излучением, для расчета мощности, поглощаемой частицей от излучения земной поверхности, определим $M_{EP}(D)$ – эффектив-

ное число мод, поглощаемых частицей, находящейся, например, на расстоянии 85 км от поверхности Земли

$$M_{EP}(D) = \frac{\pi D^2 \Omega_{PE}}{4 \left(\frac{c}{v}\right)^2}. \quad (12)$$

Пусть $\Psi_{2EP}(D, T_E)$ – энергия мод, облучающих поверхность полусферы графитовой частицы в телесном угле $\Omega_{PE} = \pi$.

$$\Psi_{2EP}(D, T_E) = 2P_0(v, T_E) \times M_{EP}(D) \quad (13)$$

где $P_0(v, T_E) = \frac{hv}{\exp\left(\frac{hv}{kT_E}\right) - 1}$, а T_E – температура поверхности Земли.

Множитель 2 в формуле (13) учитывает две возможные поляризации мод.

Рассчитаем $\Phi_{2EP}(D, T_E)$ – мощность, поглощаемую половиной сферической поверхности этой частицы.

$$\Phi_{2EP}(D, T_E) = \varepsilon_i \times \int_{v_1}^{v_2} \Psi_{2EP}(D, T_E) dv, \quad (14)$$

где $v_1 = 1 \times 10^{12}\text{ Гц}$, $v_2 = 6 \times 10^{15}\text{ Гц}$.

Ранее в работе [14] нами было предложено рассчитывать эффективное число мод, облучающих поверхность полусферы СЧ, по следующему выражению:

$$Ma_{EP}(D) = \begin{cases} \frac{S_{csa} \Omega v^2}{c^2} & \text{if } \frac{S_{csa} \Omega v^2}{c^2} \geq 1 \\ \left(\frac{2D}{\frac{c}{v}}\right)^2 & \text{if } < 1 \end{cases} \quad (15)$$

Тогда $\Psi_{2aEP}(D, T_E)$ – энергия мод, облучающих поверхность полусферы частицы в телесном угле $\Omega_{PE} = \pi$ и $\Phi_{2aEP}(D, T_E)$ – мощность, поглощаемая половиной сферической поверхности этой частицы, записывались следующим образом:

$$\Psi_{2aEP}(D, T_E) = 2P_0(v, T_E) \times Ma_{EP}(D) \quad (16)$$

$$\Phi_{2aEP}(D, T_E) = \varepsilon_i \times \int_{v_1}^{v_2} \Psi_{2aEP}(D, T_E) dv \quad (17)$$

Расчет мощности, затрачиваемой на сублимацию СЧ

Солнечное и земное излучение приводят к нагреву СЧ, причем мелкие частицы нагреваются до более высоких равновесных температур, чем крупные [6], в результате чего возможно их разрушение вследствие плавления, кипения и испарения. Последний процесс – испарение из твердой фазы (сублимация) наиболее вероятен в разреженной атмосфере и в безвоздушном пространстве.

Введем следующие обозначения:

$P_{Tor}(T1)$ – давление пара над поверхностью вещества, испаряемого в вакууме, в Торр;

$\Gamma(D, T1)$ – скорость испарения по массе СЧ диаметром D , при постоянной температуре $T1$, в кг/с;

ρ – удельный вес испаряемого вещества, в кг/м³;

$t(D, T1)$ – время, за которое испаряется СЧ диаметром D , при постоянной температуре $T1$, в сек;

Q – удельная теплота испарения графита, в Дж/кг;

$\Phi_e(D, T1)$ – мощность, требуемая для испарения СЧ диаметром D , при постоянной температуре $T1$, в Вт;

M – молярная масса вещества частицы.

Удаление массы материала с поверхности частицы вследствие сублимации можно рассчитать, используя формулу Кнудсена–Ленгмюра без учета обратного потока конденсации [21, 22].

Тогда получим:

$$\Gamma(D, T1) = 5,84 \times 10^{-1} P_{Tor}(T1) \sqrt{\frac{M}{T1}} \times \pi D^2 \quad (18)$$

где

$$P_{Tor}(T1) = 5 \times 10^{14} \exp\left(-\frac{90000}{T1}\right) \times \frac{1}{133,322} \quad (19)$$

$$t(D, T1) = \frac{\rho \frac{\pi D^3}{6}}{\Gamma(D, T1)} \quad (20)$$

$$\Phi_e(D, T1) = Q \times \Gamma_e(D, T1) \quad (21)$$

Расчет мощности, теряемой частицами, при столкновениях с более холодными молекулами азота

Введем следующие обозначения:

z – расстояние от поверхности Земли до слоя, в котором находятся серебристые облака;

T_m – температура молекул газа на этом расстоянии;

P_m – давление газа на этом расстоянии;

m – молярная масса азота;

v_m – средняя скорость молекул;

N_m – плотность молекул;

$\sigma_{pm}(D)$ – сечение столкновения частицы с молекулой;

g – ускорение свободного падения;

$\Phi_{pm}(D)$ – зависимость мощности, передаваемой (при столкновениях) частицами, имеющими температуру $T1$ молекулам, находящимся при температуре T_m , от диаметра частиц.

Тогда [23]:

$$\Phi_{pm}(D) = \frac{3}{2} k (T1 - T_m) v_m N_m \sigma_{pm}(D) \quad (22)$$

где

$$v_m = \sqrt{\frac{8kT_m}{\pi m}} \quad (23)$$

$$N_m = \frac{P_m}{kT_m} \quad (24)$$

$$P_m = 10^5 \exp\left(-\frac{mgz}{kT_m}\right) \quad (25)$$

$$\sigma_{pm}(D) = \frac{\pi D^2}{4} \quad (26)$$

Зависимости $\Phi_{pm}(D)$ показаны на рис. 2 и 3. Расчеты проводились при $T_m = 190 \text{ K}$ [10].

Результаты расчетов

На рис. 1 (для сравнения) приведены зависимости от диаметра СЧ-мощностей, поглощаемых частицами из углерода (графит, сажа), от излучения Земли, рассчитанные по разным методикам. На этом же рисунке приведена зависимость $\Phi_1(D, T1)$ – зависимость мощности, излучаемой графитовой частицей,

нагреваемой излучением Земли. Во всех случаях температура поверхности Земли T_E принималась равной 300 К.

При расчете $\Phi 2_{EPM}(D, T_E)$ использовались данные, полученные из обработки графиков, приведенных в [24]. При расчете $\Phi 2_{EPB}(D, T_E)$, использовалось асимптотическое приближение (см. формулу (1)) для описания зависимости сечения поглощения частичек от комплексного показателя преломления, предложенное в [12, 13, 25]. По данным, приведенным в [26], были получены следующие зависимости для действительной и мнимой части комплексного показателя преломления сажи: $n(\lambda) = 2,346 + 0,879 \times 10^6 \times \lambda - 0,04 \times 10^{12} \times \lambda^2 + 0,0012 \times 10^{18} \times \lambda^3$; $k(\lambda) = 0,982 + 1,126 \times 10^6 \times \lambda - 0,77 \times 10^{12} \times \lambda^2 + 0,0024 \times 10^{18} \times \lambda^3$. Расчет проводился по формулам (13–19), приведенным в работе [14]. При расчете зависимости $\Phi 2_{EPKr}(D, T_E)$ использовался метод, основанный на учете глубины проникновения излучения в материал СЧ. При этом при расчете использовались следующие данные, полученные из [15] $n_e = 1,4 \times 10^{26} \text{ м}^{-3}$; $\tau = 2 \times 10^{-13} \text{ с}$; $\omega_p = 5,7 \times 10^{14} \text{ Гц}$. (Где n_e – концентрация сво-

бодных электронов в графите; τ – время релаксации электронов в графите; ω_p – плазменная частота). Расчет проводился по формулам (13–19), приведенным в [14]. Видно, что графики зависимостей $\Phi 2_{EP}(D, T_E)$ и $\Phi 2a_{EP}(D, T_E)$ полностью совпадают при $D > 2 \times 10^{-5} \text{ м}$ и мало отличаются при $D < 2 \times 10^{-5} \text{ м}$. Зависимости $\Phi 2_{EP}(D, T_E)$ и $\Phi 2_{EPM}(D, T_E)$ полностью совпадают при $D > 2 \times 10^{-6} \text{ м}$, но имеют очень существенные отличия при $D < 2 \times 10^{-6} \text{ м}$. Очень небольшое отличие друг от друга наблюдается на участке $5 \times 10^{-8} \text{ м} < D < 9 \times 10^{-7} \text{ м}$ между зависимостями $\Phi 2_{EP}(D, T_E)$ и $\Phi 2_{EPB}(D, T_E)$. Однако, при этом следует отметить, что методика, по которой рассчитывалась последняя зависимость, пригодна только для расчета наночастиц и непригодна для частиц микронных размеров [25]. Наибольшее отличие зависимости $\Phi 2_{EP}(D, T_E)$ от зависимости $\Phi 2_{EPKr}(D, T_E)$ наблюдается на участках $D < 1 \times 10^{-5} \text{ м}$. Приведенные зависимости показывают возможный диапазон разбросов результатов расчетов, вызванных несовершенством методик и погрешностями величин исходных данных.

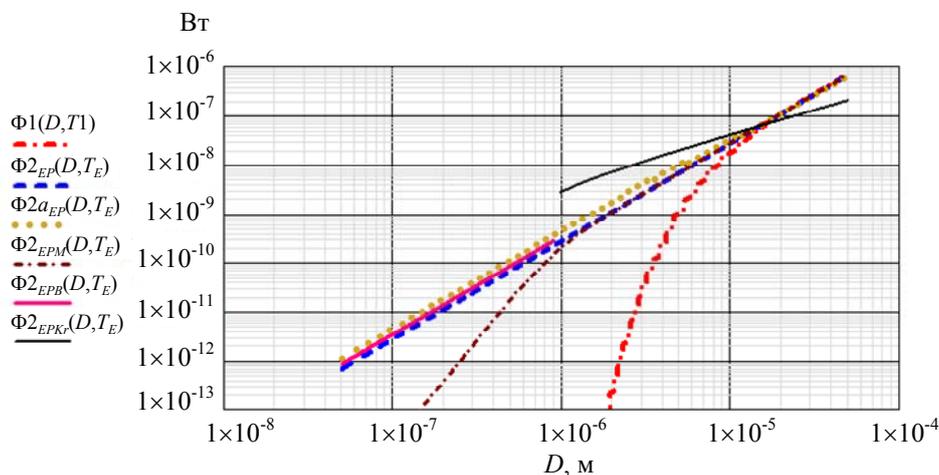


Рис. 1. $\Phi 1(D, T_1)$ – зависимость мощности, излучаемой графитовой частицей, рассчитанная при $T_1 = 216 \text{ К}$. $\Phi 2_{EP}(D, T_E)$ – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицей, рассчитанная по методике, описанной в настоящей работе (см. формулу (14)). $\Phi 2a_{EP}(D, T_E)$ – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицей, рассчитанная по методике, описанной в настоящей работе (см. формулу (17)). $\Phi 2_{EPM}(D, T_E)$ – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицы, рассчитанной по методу, основанному на учете глубины проникновения излучения в материал СЧ. $\Phi 2_{EPB}(D, T_E)$ – зависимость мощности, поглощаемой сферической частичкой сажи. $\Phi 2_{EPKr}(D, T_E)$ – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицей

Нам представляется, что выражение $\Phi_{2EP}(D, T_E)$ наиболее адекватно и естественно описывает зависимость мощности, поглощаемой СЧ от излучения земной поверхности. Из совпадения зависимостей $\Phi_{2EP}(D, T_E)$ и $\Phi_1(D, T_1)$ (зависимость $\Phi_1(D, T_1)$ рассчитывалась при $T_1 = 216 \text{ K}$) на участке $D \gtrsim 1,5 \times 10^{-5} \text{ м}$, следует, что на этом участке частицы нагреваются только излучением Земли до температуры 216 K.

Предполагая, что вся мощность солнечной и земной радиации, поглощаемой СЧ, расходуется только на излучение СЧ, сублимацию и частично теряется при столкновениях с молекулами азота, запишем следующее уравнение баланса энергии:

$$\Phi_1\Sigma(D, T_1) = \Phi_2\Sigma(D, T_S, T_E) \quad (27)$$

где

$$\Phi_1\Sigma(D, T_1) = \Phi_1(D, T_1) + \Phi_e(D, T_1) + \Phi_{pm}(D) \quad (28)$$

$$\Phi_2\Sigma(D, T_S, T_E) = \Phi_2(D, T_S) + \Phi_{2EP}(D, T_E) \quad (29)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 2–5 в виде зависимостей $\Phi_1(D, T_1)$, $\Phi_2\Sigma(D, T_S, T_E)$, $\Phi_e(D, T_1)$, $\Phi_1\Sigma(D, T_1)$, $\Phi_{pm}(D)$, $T_1(D)$ и $t(D)$ от диаметров СЧ. При расчетах предполагалось, что при сублимации углерода (графита) испаряемые молекулы углерода имеют параметры, усредненные по всем фракциям (от C_1 до C_{18}) с молекулярным весом 24 г/моль и $Q = 30 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$ [21].

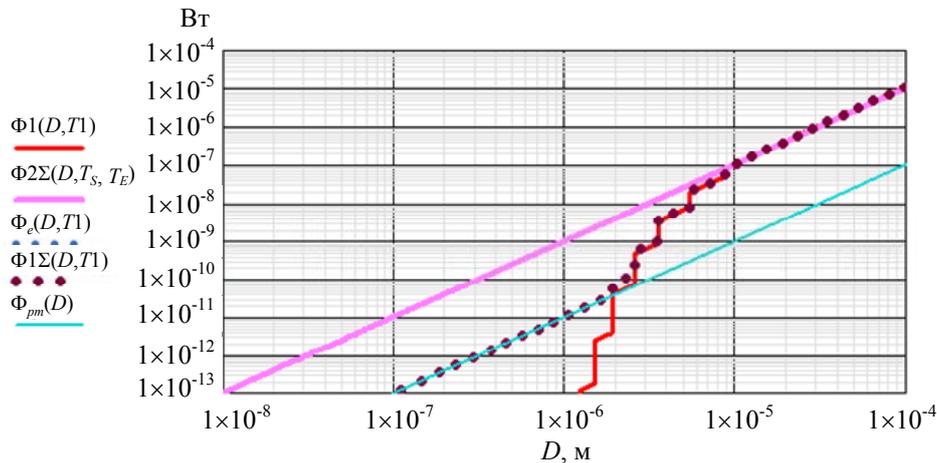


Рис. 2. Зависимости $\Phi_1(D, T_1)$, $\Phi_2\Sigma(D, T_S, T_E)$, $\Phi_1\Sigma(D, T_1)$ и $\Phi_{pm}(D)$ от диаметра СЧ, рассчитанные при $T_1 = 300 \text{ K}$, $T_S = 5780 \text{ K}$, $T_E = 273 \text{ K}$, $z = 85 \text{ км}$, $T_m = 190 \text{ K}$ и $\epsilon_i = 0,77$

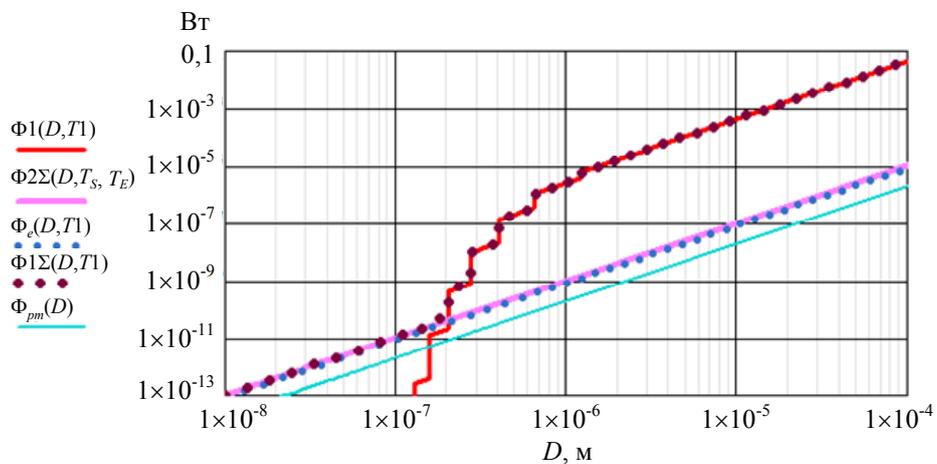


Рис. 3. Зависимости $\Phi_1(D, T_1)$, $\Phi_2\Sigma(D, T_S, T_E)$, $\Phi_e(D, T_1)$, $\Phi_1\Sigma(D, T_1)$ и $\Phi_{pm}(D)$ от диаметра СЧ, рассчитанные при $T_1 = 2385 \text{ K}$, $T_S = 5780 \text{ K}$, $T_E = 273 \text{ K}$, $z = 85 \text{ км}$, $T_m = 190 \text{ K}$ и $\epsilon_i = 0,77$

Из приведенных на рис. 2 зависимостей видно, что при $D \approx 1 \times 10^{-5}$ м частицы под действием солнечного и земного излучения нагреваются до равновесной температуры 300 К, тепловые потоки $\Phi 2\Sigma(D, T_S, T_E)$ и $\Phi 1\Sigma(D, T_1)$ при этом равны и не зависят от диаметра частиц. При $D \lesssim 1 \times 10^{-5}$ м $\Phi 1\Sigma(D, T_1)$ становится меньше теплового потока $\Phi 2\Sigma(D, T_S, T_E)$, поглощаемого СЧ от солнечной и земной радиации. Следовательно, температура СЧ, находящейся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, должна повышаться при дальнейшем уменьшении диаметра СЧ.

Например, из приведенных на рис. 3 зависимостей, следует, что при $z = 85$ км равенство тепловых потоков $\Phi 2\Sigma(D, T_S, T_E)$ и $\Phi 1\Sigma(D, T_1)$ (которое в условиях термодинамического равновесия должно быть при любых D) достигается в точке их пересечения при $D \approx 2 \times 10^{-7}$ м при температуре частиц $T_1 = 2385$ К.

На рис. 4 приведена зависимость $T_1(D)$ – температуры СЧ, находящейся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. При любых $D \gtrsim 1 \times 10^{-5}$ м равенство тепловых потоков $\Phi 2\Sigma(D, T_S, T_E)$ и $\Phi 1\Sigma(D, T_1)$ достигается при температуре частиц $T_1 = 300$ К. Однако, на участке 2×10^{-7} м $\lesssim D \lesssim 1 \times 10^{-5}$ м это равенство может быть достигнуто только путем увеличения температуры СЧ, которое происходит по мере уменьшения их размеров. Повышение температуры при уменьшении диаметров СЧ приводит к быстрому увеличению скорости испарения, в результате чего температура на участке 5×10^{-8} м $\lesssim D \lesssim 2 \times 10^{-7}$ м практически перестает возрастать при уменьшении диаметров СЧ и стабилизируется, достигнув максимальной величины около 2385 К. Отметим, что (без учета излучения Земли) температура частиц, нагреваемых только солнечным излучением, была бы: 283 К (при $D \gtrsim 1 \times 10^{-5}$ м) и 2337 К (при 5×10^{-8} м $\lesssim D \lesssim 2 \times 10^{-7}$ м).

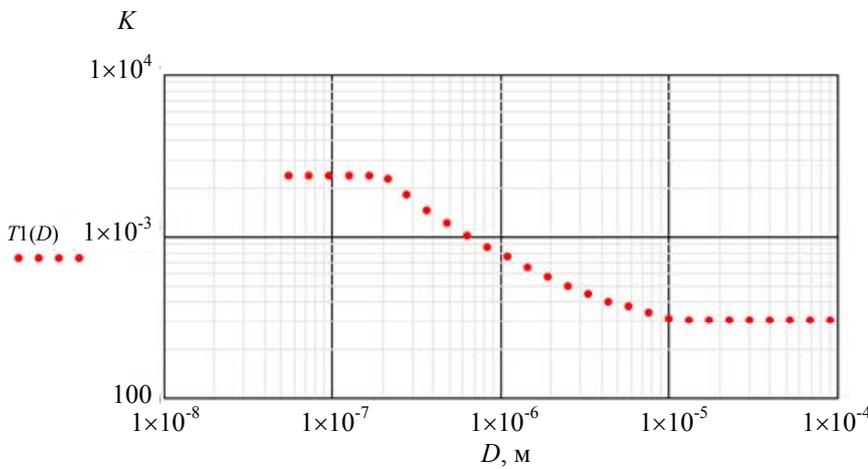


Рис. 4. Зависимость $T_1(D)$ – равновесной температуры субволновых частиц углерода от их диаметра, рассчитанная при $T_S = 5780$ К, $T_E = 273$ К, $z = 85$ км, $T_m = 190$ К и $\varepsilon_i = 0,77$

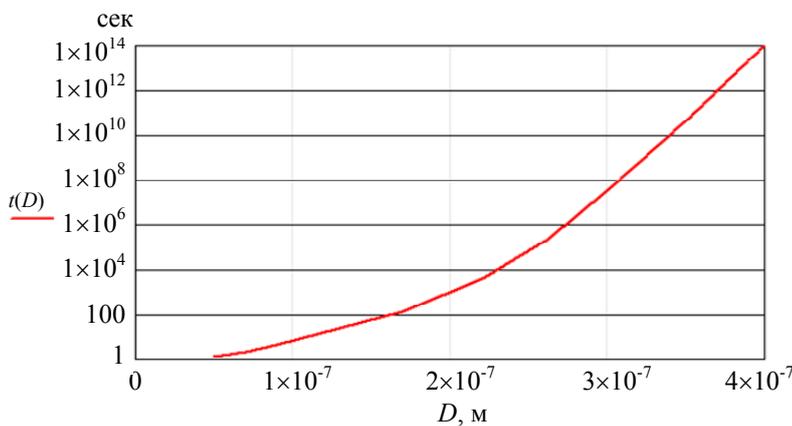


Рис. 5. Зависимость времени сублимации наночастиц углерода от их диаметра, рассчитанная при $T_S = 5780$ К, $T_E = 273$ К, $z = 85$ км, $T_m = 190$ К и $\varepsilon_i = 0,77$

Видно, что время сублимации (время жизни) частиц очень сильно зависит от их диаметра, что в первую очередь обусловлено очень сильной зависимостью скорости испарения от температуры. Также следует принять во внимание то, что скорость испарения частицы пропорциональна площади ее поверхности, а испаряемая масса частицы пропорциональна D^3 . Из графика следует, что время жизни графитовой СЧ с $D \approx 3,3 \times 10^{-7}$ м составляет около 320 лет, а время жизни частицы с $D \approx 1,5 \times 10^{-7}$ м составляет всего около 90 се-

кунд, т. е. частицы с $D \lesssim 3 \times 10^{-7}$ м (даже из такого трудно испаряемого материала как графит) постоянно уничтожаются солнечным излучением на расстояниях от Солнца меньших или равных 1 А.Е. Таким образом, солнечное излучение *селектирует* межпланетную пыль по размерам и составу. Частицы из материалов, имеющих меньшую температуру сублимации, уничтожаются еще более эффективно. На расстояниях от Солнца около 1 А.Е. и более выживают графитовые частицы с размерами, превышающими единицы микрон.

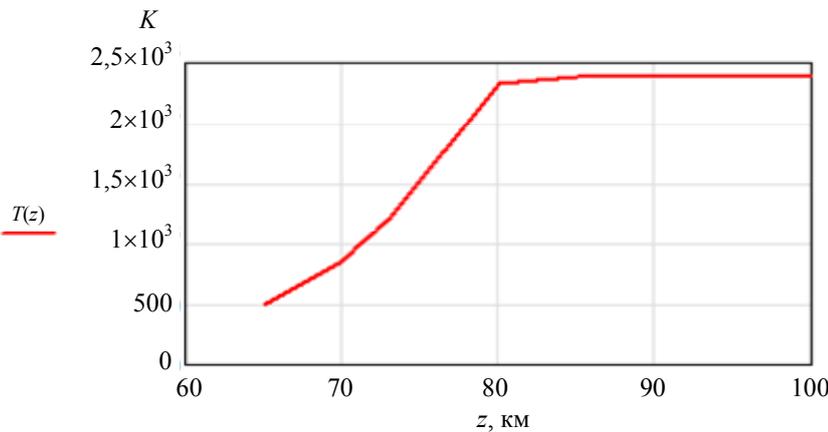


Рис. 6. Зависимость температуры наночастиц углерода от z -расстояния от поверхности Земли, рассчитанная при $T_s = 5780$ К, $T_E = 273$ К, и $\varepsilon_i = 0,77$

Видно, что на участке $65 \text{ км} < z < 80 \text{ км}$ температура наночастиц быстро увеличивается при увеличении высоты, вследствие уменьшения потерь энергии частиц при столкновениях с молекулами атмосферы, концентрация которых уменьшается с увеличением высоты. На участке $80 \text{ км} < z < 85 \text{ км}$ скорость роста температуры замедляется, вследствие начала процесса сублимации и наконец, прекращается при $z \gtrsim 85 \text{ км}$, когда дальнейший рост температуры ограничивается возрастающей скоростью сублимации.

Выше было показано, что под действием солнечной и земной радиации наночастицы из материалов с высокой температурой сублимации, находящиеся на высотах порядка 85 км и более, могут нагреваться до температур порядка 2380 К (в случае углеродных частиц). Такие раскаленные частицы излучают в видимой области спектра. Излучения скоплений подобных частиц на фоне темного неба в предзакатное или послезакатное время может представляться наблюдателям в виде светящихся облаков – Серебристых облаков.

Возникновение серебристых облаков сопровождается резким усилением мезосферных

радиоотражений (PMSE) на радарях, работающих на частотах 50–1000 МГц. В литературе NLC и PMSE часто объединяют, называя их полярными мезосферными облаками или PMC (Polar Mesospheric Clouds). В [27] высказано предположение, что PMSE обусловлено наличием наномасштабных заряженных частиц, образующихся в плазменно-пылевых структурах в ионосфере. Очевидно, что нагрев наночастиц до температур выше 2300 К сопровождается термоэмиссией электронов, приводящей к образованию положительно заряженных наночастиц и увеличению плотности электронов вокруг каждой частицы.

Проведем оценку плотности электронного облака вокруг каждой частицы.

Введем следующие обозначения:

$I_p(D, T)$ – ток электронов, эмитированных частицей;

I_e – ток электронов, падающих на частицу;

T – температура частицы;

A – постоянная Зоммерфельда; $A = 1,2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \cdot \text{К}^2$

q – заряд электрона;

Φ_e – работа выхода электронов из графита (при отсутствии внешнего электрического поля);

Φ_o – потенциал частицы;

m – масса электрона;

v_e – среднеарифметическая тепловая скорость электронов, падающих на частицу;

T_{av} – средняя температура электронов, падающих на частицу;

n_{eo} – средняя концентрация электронов на высоте 90 км. $n_{eo} \approx 10^9 \text{ м}^{-3}$ [28, 29];

n_e – плотность электронного облака вокруг частицы;

N_p – плотность частиц на высоте Z от поверхности Земли. (Концентрация пылевых частиц на высотах 90–95 км составляет 10^7 м^{-3} , на высотах 85–90 км от 10^8 до 10^9 м^{-3} [27]);

$n_{e\Sigma}$ – средняя концентрация электронов на высоте 90 км при наличии раскаленных наночастиц углерода.

$$I_p(D, T) = A(\pi D^2) T^2 \exp\left[\frac{q\Phi_e + q\Phi_o}{kT}\right] \quad (30)$$

$$I_e = \pi D^2 q n_e v_e, \quad (31)$$

$$\text{где } v_e = \left(\frac{8kT_{av}}{\pi m_e}\right)^{0,5}$$

При локальном термодинамическом равновесии: $I_p(D, T) = I_e$

$$\text{Тогда } n_e = \frac{AT^2 \exp\left[\frac{q\Phi_e + q\Phi_o}{kT}\right]}{|q|v_e} \quad (32)$$

где [30]:

$$\Phi_o = \frac{1}{\xi} \left(\ln\left(\frac{8AT_p^2}{|q|n_e v_e}\right) - \xi\Phi_e \right) \quad (33)$$

$$\xi = \frac{|q|}{kT_p} \quad (34)$$

Будем считать, что $\Phi_e = 4,7 \text{ эВ}$ [31], $T_{av} \approx T$.

Тогда, даже полагая, что концентрация частиц с диаметрами от 50 до 200 нм (которые

нагреваются до температур около 2385 K и создают высокую термоэмиссию) составляет всего 10 % от средней концентрации частиц на высоте 90 км равной $N_p = 10^9 \text{ м}^{-3}$, получим следующие величины: $n_e = 2,66 \times 10^2 \text{ м}^{-3}$ и $n_{e\Sigma} = n_e \times N_p + n_{eo} = 2,93 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ и $n_{e\Sigma} / n_{eo} = 29$.

Таким образом, наличие раскаленных наночастиц, образующих серебристые облака, приводит (с учетом сделанных нами предположений и допущений) к увеличению средней концентрации электронов в пылевой плазме более чем в 20 раз. Этим, вероятно, можно объяснить возникновение мезосферных радиотражений (PMSE) на радарх, которые появляются вместе с возникновением серебристых облаков.

Серебристые облака – самые высокие облачные образования в земной атмосфере. Диапазон высот, на которых чаще всего образуются серебристые облака: 73–95 км [32]. Часто облачное поле состоит из нескольких, довольно узких по высоте слоев. Серебристые облака называют также полярными мезосферными облаками (polar mesospheric clouds, PMC) или ночными светящимися облаками (noctilucent clouds, NLC). Это светлые полупрозрачные облака, которые иногда видны на фоне темного неба летом после захода солнца или перед его восходом в средних и высоких широтах. Серебристые облака имеют белый или серебристый цвет с голубоватым отливом, принимая в непосредственной близости у горизонта желтый, золотистый оттенок.

До настоящего времени в научном сообществе нет единого мнения относительно происхождения серебристых облаков. Тот факт, что это атмосферное явление не наблюдалось до 1885 г., многих учёных привел к мысли, что их появление связано с извержением вулкана Кракатау в Индонезии 27 августа 1883 г., когда в атмосферу было выброшено около 35 млн тонн вулканической пыли и огромная масса водяного пара. В настоящее время обсуждаются другие гипотезы: метеорная, техногенная, гипотеза о «солнечном дожде» и др. [33–38]. Но до сих пор многие факты в этой области неполны и противоречивы. В большинстве публикаций предполагается, что метеорные пылинки в мезосфере обрастают ледяными оболочками (из воды или

метана) и если вырастают до размеров, более 100 нм, то начинают отражать и рассеивать солнечный свет, доходящий до облаков из-за горизонта. Днем, даже на фоне чистого голубого неба, эти облака не видны. Правда, с помощью аппаратуры, поднятой на большие высоты, эти облака можно регистрировать и в дневное время. Легко убедиться в поразительной прозрачности серебристых облаков: сквозь них прекрасно видны звезды. В работах [33, 35] и др. была развита метеорно-конденсационная гипотеза серебристых облаков. В ней метеорные частицы играют роль ядер конденсации, без которых образование в атмосфере капель и кристаллов из пара чрезвычайно затруднено. Эта гипотеза отчасти опирается на результаты ракетных экспериментов, в ходе которых на высотах 80–100 км были собраны микроскопические твердые частицы с намерзшей на них ледяной "шубой". При запуске ракет в зону наблюдавшихся серебристых облаков количество таких частиц оказывалось в сотню раз больше, чем в отсутствие облаков. Помимо упомянутых «классических» гипотез выдвигались и другие, менее традиционные; рассматривалась связь серебристых облаков с солнечной активностью, с полярными сияниями, с другими геофизическими явлениями. Например, как источник водяного пара в мезосфере подозревалась реакция атмосферного кислорода с протонами солнечного ветра (гипотеза о «солнечном дожде»). Одна из последних гипотез связывает серебристые облака с возникновением озоновых дыр в стратосфере. Но до сих пор многие факты в этой области неполны и противоречивы. Серебристые облака продолжают оставаться загадкой для естествоиспытателей.

Выводы

Проведенные оценочные расчеты температур, облучаемых Солнцем и Землей углеродных СЧ, находящихся на расстояниях в 1 А.Е. от Солнца и на высотах около 85 км от поверхности Земли показали, что:

- Минимальную температуру имеют частицы с размерами 10 мкм и более. Их температура не зависит от размера и оценивается величиной 300 К. Температура частиц с размерами меньшими 10 мкм увеличивается при уменьшении их размера.

- Углеродные частицы с размерами $5 \times 10^{-8} \text{ м} \lesssim D \lesssim 2 \times 10^{-7} \text{ м}$ нагреваются до температур 2385 К, сублимируются и перестают существовать. (Температура плавления графита $3850 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, однако его сублимация — интенсивное испарение в вакууме — начинается при 2200 °C).

- Пылинки из других материалов сублимируются при меньших температурах и, следовательно, солнечное излучение приводит к выжиганию таких пылинок, находящихся в околоземном пространстве, не только с субмикронными, но и с микронными размерами.

Основываясь на результатах проведенных расчетов и литературных данных можно сделать следующее предположение по поводу межпланетной пыли на расстояниях от Солнца около 1 А.Е.

Наряду с солнечным ветром, «выметающим» пылинки размерами меньшими 0,1 мкм из сферы вокруг Солнца диаметром равным 1 А.Е., одним из факторов, объясняющих то, что подавляющую долю пылинок внутри этой сферы составляют пылинки с размерами от нескольких микрон и выше, является «выжигание» солнечным излучением углеродных пылинок с размерами меньшими $2 \times 10^{-7} \text{ м}$ и пылинок из других материалов не только с субмикронными, но и с микронными размерами.

- Серебристые облака представляют собой скопления межпланетных частиц с высокими температурами сублимации (вероятно, это смесь углеродных, оливиновых, пироксеновых, кремниевых и железных частиц), с размерами менее 0,2–0,25 мкм, нагретых до высоких температур. При указанных размерах и температурах спектр излучения частиц не описывается формулой Планка [16, 32], т. к. частицы не могут излучать свет с длинами волн большими длины волны отсечки $\lambda_{\text{cutoff}} = 2,221 \times D$. Например, при $D = 0,25 \text{ мкм}$, $\lambda_{\text{cutoff}} = 0,555 \text{ мкм}$. Таким образом, в непрерывном спектре излучения этих частиц будут отсутствовать волны, длина которых больше желто-зеленой волны 0,555 мкм, но будут присутствовать все волны короче 0,555 мкм. Излучение частиц с $D = 0,2 \text{ мкм}$ будет иметь синий цвет. Очевидно, что результирующий цвет серебристых облаков будет определяться распределением частиц по диаметрам и их

температурой, которая очень сильно зависит от их диаметров. Отметим, что наряду с излучением от Солнца и Земли, другим источником нагрева частиц может быть преобразование их кинетической энергии в тепло при столкновении с молекулами в верхних слоях атмосферы. Например, в [6] расчетным путем было показано, что гиперскоростные метеороиды (скорость около 12 км/с) с размерами порядка 100 мкм при входе в мезосферу достигают максимальной температуры около 1500 K на высоте 90 км от Земли, а гиперскоростные пылинки с размерами 0,1 мкм могут разогреваться до температур 1500–2500 K на высотах 190–200 км. Выше было отмечено, что на высотах 80–130 км входящие в атмосферу метеорные тела претерпевают процесс абляции – дробления, испарения и распыления, а частицы межпланетной и межзвездной пыли с размерами от 0,1 мкм до 25–40 мкм в результате столкновений с молекулами воздуха быстро замедляются (на высотах ~ 100 км) от своих начальных скоростей входа > 10 км/с до тепловых скоростей, затем они медленно опускаются в атмосферу со скоростью оседания порядка см/с. Концентрация пылевых частиц на высотах 90–95 км составляет 10 см^{-3} , а на высотах 85–90 км от 100 до 1000 см^{-3} [27, 35].

- Предложенная нами гипотеза хорошо объясняет диапазон высот, на которых наблюдаются серебристые облака. Из графика на рис. 6 видно, что частицы достигают температур, при которых начинается видимое свечение ($T > 900 \text{ K}$) при высотах, превышающих 70 км. Максимальная температура частиц ($T = 2385 \text{ K}$) и максимальная интенсивность светло-синего свечения достигается на высоте 85 км. С дальнейшим ростом высоты температура частиц больше не увеличивается, но при этом быстро падает их концентрация и, следовательно, уменьшается суммарное излучение этого слоя частиц. Поэтому, в диапазоне высот 73 км – 95 км и наблюдаются серебристые облака.

- Вероятность появления серебристых облаков зависит от концентрации, состава и размера пылинок, что в свою очередь зависит от временных периодов, когда орбиту Земли пересекают метеорные потоки. Орбиту Земли ежегодно пересекают несколько десятков метеорных потоков, состоящих из тел малого

размера: менее 0,1 см – пылевой составляющей и от 0,1 см до 100 м – метеороидов. В настоящее время известно около 20 главных метеорных потоков с часовыми числами 20–140 метеоров в час. Кроме них выделяют до 6000 малых метеорных потоков или ассоциаций [39].

ЛИТЕРАТУРА

1. Огурцов М. Г. / Труды конференции 31-я ВККЛ. – Москва, МГУ, 2010. С. 1–5.
2. Ермаков В. И., Охлопков В. П., Стожков Ю. И. / Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 5. С. 41.
3. Мазеева О. А. / Астрономический вестник. 2004. Т. 38. № 4. М. 37.
4. Попель С. И. / «Природа». 2015. № 9.
5. Попель С. И. / Плазменная гелиогеофизика / под ред. Зеленого Л. М., Веселовского И. С. – М., 2008. Т. 2. С. 371–394.
6. Coulson S. G. / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2003. Vol. 343. Is. 4. P. 1123–1130. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06478.x>
7. Love S. G., Brownlee D. E. / Icarus. 1991. Vol. 89 (1). P. 26–43.
8. Аллен К. У. Астро-физические величины / пер. с англ. Халиуллина Х. Ф. / под ред. Мартынова Д. Я. – М.: Изд-во «МИР», 1977.
9. Mann I., Krivov A., Kimura H. / Icarus. 2000. Vol. 146. № 2. P. 568–582.
10. Патинскас В. / Гид в мире космоса → Планеты → Атмосфера Земли. 2016 <https://spacegid.com/atmosfera-zemli.html>.
11. Gustafson A. S. / Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1994. Vol. 22. P. 553.
12. Van de Hurst H. C. Light Scattering by Small Particles. – New York: Dover, 1957.
13. Wickramasinghe N. C. Light Scattering by Small Particles. – New York: Wiley, 1975.
14. Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 44–55.
15. Krugel Endrik. The Physics of Interstellar Dust. Series in Astronomy and Astrophysics. Max-Planck-Institut für Radioastronomie. – Bonn, Germany: IOP Publishing Ltd., 2003.
16. Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д. / Прикладная физика. 2021. № 2. С. 12–21.
17. Sviridov A. N., Saginov L. D. / Journal of communications technology and electronics. 2022. Vol. 67. Suppl. 1. P. S91.
18. Фридрихов С. А., Мовнин С. М. Физические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1982.
19. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь. – М.: Связь, 1978.
20. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988.
21. Еришов А. В., Нежданов А. В. Напыление тонких пленок испарением в вакууме: Практикум. – Нижний Новгород: НГУ им. Н. И. Лобачевского, 2020. – 30 с.

22. Майселл Л., Гленг Р. Технология тонких пленок. Справочник. Т. 1 / пер. с англ., под ред. Елинсона М. И., Смолко Г. Г. – М.: «Советское радио», 1977.
23. Смирнов Б. М. / УФН. 1997. Т. 167. № 11. С. 1169–1200.
24. Мартыненко Ю. В., Огнев Л. И. / ЖТФ. 2005. Т. 75. № 11. С. 130.
25. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986.
26. Database refractive indices., <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=C&page=Phillip>
27. Дубинский С. А., Попель С. И. / Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. Вып. 1. С. 22–28.
28. <https://историиземли.рф/atmosfera-zemli.html?ysclid=lmuqrmv2ug171468805>
29. <https://helpiks.org/5-76157.html>
30. Федоров В. А. / ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 4. С. 1–5.
31. <http://mephi-v05.narod.ru/>
32. Сурдин В. Г. / ГАИШ. Москва 22.07.2006. <http://www.astronet.ru/db/msg/1214909>
33. Бронитэн В. А. Серебристые облака и их наблюдение. – М.: Наука, 1984.
34. Bailey S. M., Hervig M. E., Randall C. E. / Reviews of Geophysics. 2017. Vol. 55 (4). P. 902–944.
35. Новости. Астрономия для всех. Серебристые облака 20.06.2018. <https://www.roscosmos.ru/25217/>
36. Морозова Т. / Наука и жизнь. Апрель 2023. № 04.
37. Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 42–51.
38. Метеорное вещество и климат Земли. <http://www.allbest.ru/>, https://dzen.ru/a/X8aJdW1Oalw_3aQt.
39. Мезосфера Земли: описание и свойства. <https://natura.ru/atmosfera-zemli/stroenie-atmosfery/mezosfera.html>.

PACS: 44.40.+a, 42.68Ay, 42.72.g

The effect of solar radiation on dust in near-Earth space

A. N. Sviridov and L. D. Saginov

FSAC VIM

5 1st Institutsky proezd, Moscow, 109428, Russia

E-mail: sviridtoly@yandex.ru

Received 25.09.2023; accepted 6.10.2023

Calculations of the temperatures of dust particles (using the example of carbon particles) heated by solar and terrestrial radiation at altitudes of 65–100 km have been carried out. It is shown that the particles reach temperatures at which visible luminescence begins ($T > 900$ K) at altitudes exceeding 70 km. The maximum temperature of the particles ($T = 2385$ K) and the maximum intensity of the light blue glow is reached at an altitude of 85 km. It is shown that particles with sizes of 10 microns or more have a minimum temperature at this height. Their temperature does not depend on the size and is estimated at 300 K. The temperature of particles with sizes smaller than 10 microns increases with a decrease in their size. Carbon particles with sizes smaller than 210–7 m are heated to temperatures of 2385 K, sublime and eventually cease to exist. The radiation of clusters of such particles against the background of a dark sky in the pre-dawn or post-sunset time can be presented to observers in the form of luminous clouds - Silvery clouds. Dust particles from other materials sublime at lower temperatures and, consequently, solar radiation leads to the burning of similar dust particles located in near-Earth space not only with submicron, but also with micron sizes. Based on the calculations and analysis of the literature data, the following hypothesis is formulated about the nature of silvery clouds: Silvery clouds are clusters of incandescent nanoparticles

Keywords: Planck's law, Stefan-Boltzmann's law, Wien's displacement law, Kirchhoff's law, diffraction, radiation flux density, radiation coefficient, absorption coefficient, spatial spectral mode, mode energy, sublimation, Knudsen–Langmuir formula, thermal emission, interplanetary dust, subwavelength particles, silvery clouds, mesospheric clouds.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-384-398

REFERENCES

1. Ogurtsov M. G., Proc. 31st VKKL. Moscow, MSU, 2010, pp. 1–5.
2. Ermakov V. I., Okhlopkov V. P. and Stozhkov Yu. I., Bulletin of the Moscow University. Ser. 3. Physics. Astronomy, № 5, 41 (2007).
3. Mazeeva O. A., Astronomical Bulletin **38** (4), 37 (2004).
4. Popel S. I., "Nature", № 9 (2015).
5. Popel S. I., Plasma heliogeophysics / Ed. by L. M. Zeleny, I. S. Veselovsky., Moscow, Vol. 2, 2008, pp. 371–394.
6. Coulson S. G., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **343** (4), 1123–1130 (2003). <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06478.x>.
7. Love S. G. and Brownlee D. E., Icarus **89** (1), 26–43 (1991).
8. Allen C. W., Astrophysical Quantities. University of London, 1973.
9. Mann I., Krivov A. and Kimura H., Icarus **146** (2), 568–582 (2000).
10. Patinskas V., Guide in the world of space → Planets → Earth's Atmosphere Earth's Atmosphere] 2016. <https://spacegid.com/atmosfera-zemli.html>.
11. Gustafson A. S., Ann. Rev. Earth Planet. Sci. **22**, 553 (1994).
12. Van de Hurst H. C., Light Scattering by Small Particles. Dover, New York, 1957.
13. Wickramasinghe N. C., Light Scattering by Small Particles, Wiley, New York, 1972.
14. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Applied Physics, № 2, 44–55 (2023) [in Russian].
15. Krugel Endrik, The Physics of Interstellar Dust. Series in Astronomy and Astrophysics. Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, Germany. IOP Publishing Ltd., 2003.
16. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Applied Physics, 2, 12–21 (2021) [in Russian].
17. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Journal of communications technology and electronics **67** (1), S91 (2022).
18. Fridrikhov S. A. and Movnin S. M., Physical bases of electrical engineering. Higher school, Moscow, 1982 [in Russian].
19. Gagliardi R. M. and Sherman Karp, Optical communications. Wiley & Sons, New York, 1976; Svyaz, Moscow, 1978.
20. Goussorgues G., La Thermography Infrarouge. Principes – Technique – Applications, Deuxieme. edition, Paris, Technique et Documentation Lavoister, 1984, Moscow, MIR, 1988.
21. Ershov A. V. and Nezhdanov A. V., Deposition of thin films by evaporation in vacuum: The workshop. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky, 2020. – 30 p.
22. Leon Maissel and Reinhard Glang. Handbook of Thin Film Technology **1**, (1970).
23. Smirnov B. M., Physics–Uspekhi **40** (11), 1117–1147 (1997).
24. Martynenko Yu. V. and Ognev L. I., Technical Physics **50**, 1522–1524 (2005).
25. Bohren C. F. and Huffmann D. R., Absorbtion and Scattering of Light by Small Particles, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons New York. Chichester. Brisbane. Toronto. Singapore, 1983.
26. Database refractive indices., <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=C&page=Phillip>
27. Dubinsky S. A. and Popel S. I., Letters to the ZhETF **96** (1), 22–28 (2012).
28. <https://историиземли.рф/atmosfera-zemli.html?ysclid=lmuqrmv2ug171468805>
29. <https://helpiks.org/5-76157.html>
30. Fedorov V. A., ZhTF **82** (4), 1–5 (2012).
31. <http://mephi-v05.narod.ru/>
32. Surdin V. G., Traffic police, Moscow 22.07.2006, <http://www.astronet.ru/db/msg/1214909>
33. Bronshten V. A., Silver clouds and their observation, Moscow, Nauka, 1984.
34. Bailey S. M., Hervig M. E. and Randall C. E., Reviews of Geophysics **55** (4), 902–944 (2017).
35. News. Astronomy for everyone. Silvery clouds 20.06.2018. <https://www.roscosmos.ru/25217/>
36. Morozova T., Science and Life. № 04. April 2023.
37. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Applied Physics, № 1, 42–51 (2022) [in Russian].
38. Meteoric matter and Earth's climate. <http://www.allbest.ru/>, https://dzen.ru/a/X8aJdW1Oalw_3aQt.
39. The mesosphere of the Earth: description and properties. <https://naturae.ru/atmosfera-zemli/stroenie-atmosfery/mezosfera.html>.