

УДК 536.3

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-5-15

EDN: LKHAQS

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



## О природе серебристых облаков

А. Н. Свиридов, Л. Д. Сагинов

*Рассмотрена динамика температуры частиц с характерным размером  $10^7$ – $10^6$  м на границе земной атмосферы и космического пространства. На примере наночастиц графита показано, что на высоте 80–90 км от поверхности Земли частицы с размером  $\sim 5 \times 10^7$  м и меньше могут нагреваться выше температуры начала свечения ( $\sim 900$  К), достигая температур более 2000 К со светло-бирюзовым свечением. На основании полученных результатов сделан вывод, что серебристые облака, наблюдаемые в предзакатное и послезакатное время с поверхности Земли, представляют собой скопление раскаленных наночастиц.*

*Ключевые слова:* закон Кирхгофа, коэффициенты излучения и поглощения, пространственная спектральная мода, сублимация, межпланетная пыль, серебристые (мезосферные) облака.

### Введение

Серебристые облака – самые высокие облачные образования в земной атмосфере. Диапазон высот, на которых чаще всего образуются серебристые облака 73–95 км [1].

До настоящего времени в научном сообществе нет единого мнения относительно происхождения серебристых облаков – обсуждается ряд гипотез – метеорная, техногенная, гипотеза о «солнечном дожде» и др. [2–8], и 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 этих облаков из-за горизонта.

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. т космического вещества [9–11], причем около 95 % падающего на поверхность Земли вещества составляют частицы размером 50–400 мкм [12, 13].

В земную атмосферу также поступают частицы межпланетной и межзвездной пыли с размерами от 0,1 мкм до 25–40 мкм [9]. Это крошечные твердые частицы из соединений углерода и кремния, похожие на мельчайший песок.

В [14–20] 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 одной астрономической единицы (1 А.Е.) от Солнца. На основании этих расчетов делались заключения о «выживаемости» разных частиц. По оценкам [18] средние температуры пылинок находятся в пределах 255–300 К.

Из литературных данных можно предполагать, что в околосолнечном пространстве на

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

E-mail: sviridtol@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 17.05.2023

Принята к публикации 20.06.2023

расстояниях равных радиусу орбиты Земли вокруг Солнца (1 А.Е.) присутствуют в основном пылинки с размерами порядка микрона и более. Причем, чем меньше размер пылинок, тем выше их температура.

В [20] было показано, что для изолированной субволновой частицы<sup>1</sup> (СЧ) (диаметр которой существенно меньше  $\lambda_{\max}$ ), помещенной в безвоздушное пространство и находящейся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, коэффициент излучения может быть меньше коэффициента поглощения. В подобных 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 – только излучению Земли.

В качестве объекта для дальнейших расчетов выберем углерод, так как он относится к одной из двух основных групп пылинок – аморфного углерода и силикатов и для него известны исходные данные [21].

Проведем расчеты температур подобных частиц по методике [20]. При этом будем исходить из представления о термодинамическом равновесии, т. е. о равенстве энергии излучения, получаемой СЧ от Солнца и Земли и энергии, которую теряет СЧ вследствие излучения, сублимации и столкновений с молекулами на границе земной атмосферы.

### Расчет мощности, излучаемой СЧ

Детальный расчет теплового потока излучаемого СЧ приведен в [20, 22, 23] на основе модовой<sup>2</sup> теории излучений [24, 25]. Число спектральных мод  $M(\lambda_m)$  распространяющихся в свободном пространстве в пучке с телесным углом  $\Omega$  от частицы с поперечным

сечением  $S_{csa}$  для любой длины волны  $\lambda_m$  этого пучка равно [25]:

$$M(\lambda_m) = (\Omega \times S_{csa}) / \lambda_m^2. \quad (1)$$

При этом для каждой пространственно-спектральной моды (мономатического луча с длиной волны  $\lambda_m$ ) справедливо следующее соотношение:

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

где  $S_m$  – площадь минимального сечения мономатического луча;  $\Omega_m$  – телесный угол, в котором распространяется этот луч.

При  $M(\lambda_m) = 1$  в пучке, излучаемом частицей, будут отсутствовать лучи (моды) с длинами волн большими  $\lambda_m$ , т. к. они не могут распространяться в свободном пространстве (дальней зоне). Обозначим  $\lambda_m$  как длину волны отсечки  $\lambda_{\text{cutoff}}$ . В случае сферической частицы с диаметром  $D$  этому условию будет соответствовать длина волны отсечки<sup>3</sup>  $\lambda_{\text{cutoff}} = 2,221 \times D$  [22].

Далее, используя общепринятые обозначения –  $h$ ,  $k$ ,  $\sigma$ ,  $c$  – соответственно, постоянные Планка, Больцмана, Стефана-Больцмана и скорость света, а также  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $T$  – соответственно, длина волны, частота излучения и температура, запишем основные соотношения.

Плотность мощности излучения черного тела в интервале частот от 0 до  $\infty$ :

$$\Phi_{bb}(T) = \sigma T^4. \quad (3)$$

Энергия одной пространственной моды с частотой  $\nu$ , излучаемой черным телом с температурой  $T_1$  [24, 25]:

$$P_o(\nu, T_1) = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_1}\right) - 1} \quad (4)$$

$\Psi_1(D, T_1)$  – энергия излучения полусферы

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

<sup>2</sup> Под пространственной спектральной модой (типом колебаний) понимают ТЕМ волну с заданными частотой  $\nu$ , волновым вектором  $k$ , и поляризацией  $\rho_e$ , где  $\rho_e$  – единичный вектор поляризации;  $e$  – индекс, принимающий только два значения:  $e = 1$  или  $2$  [24, 25].

<sup>3</sup>  $\lambda_{\text{cutoff}}$  – максимальная длина волны, которую может излучить сферическая частица диаметром  $D$  в свободное пространство.

СЧ на частоте  $\nu$  может быть рассчитана путем произведения числа мод  $M1(\nu, D)$  на энергию каждой моды  $Po(\nu, T)$ .

$$\Psi1(D, T1) = 2Po(\nu, T1) \times M1(\nu, D) \quad (5)$$

$$\text{где } M1(D) = \begin{cases} \frac{S_{csa} \Omega \nu^2}{c^2} \text{ if } \frac{S_{csa} \Omega \nu^2}{c^2} \geq 1 \\ 0 \text{ if } \frac{S_{csa} \Omega \nu^2}{c^2} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

Множитель 2 в формуле (5) учитывает две возможные поляризации мод.

$\Phi1(D, T1)$  – мощность, излучаемую поверхностью сферы частицы, рассчитывали по следующему выражению:

$$\Phi1(D, T1) = 2\varepsilon_i \times \int_{\nu_1}^{\nu_2} \Psi1(D, T1) d\nu \quad (7)$$

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

Множитель 2 в формуле (7) 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, излучаемой 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  $\varepsilon_i$  – интегральным коэффициентом поглощения «большого» тела из материала аналогичного материалу СЧ.

(Например, для графита  $\varepsilon_i = 0,74-0,78$  при  $T = 400-2400$  К, для угольной сажи  $\varepsilon_i = 0,76-0,96$  при  $T = 120-300$  К [26]).

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

$$M_{SP}(D) = \frac{\pi^2 D^2 D_S^2}{16L^2 \left(\frac{c}{\nu}\right)^2}, \quad (8)$$

где  $D_S$  – диаметр Солнца (8)

Пусть  $\Psi2_{SP}(D, T_S)$  – энергия солнечных мод, облучающих поверхность полусферы графитовой частицы.

$$\Psi2_{SP}(D, T_S) = 2Po(\nu, T_S) \times M_{SP}(D) \quad (9)$$

где  $Po(\nu, T_S) = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_S}\right) - 1}$ , а  $T_S$  – температура

поверхности Солнца.

Множитель 2 в формуле (9) учитывает две возможные поляризации мод.

Рассчитаем  $\Phi2(D, T_S)$  – мощность, поглощаемую половиной сферической поверхности этой частицы.

$$\Phi2_{SP}(D, T_S) = \varepsilon_i \times \int_{\nu_1}^{\nu_2} \Psi2(D, T_S) d\nu, \quad (10)$$

где  $\nu_1 = 1 \times 10^{12}$  Гц,  $\nu_2 = 6 \times 10^{16}$  Гц.

### Расчет мощности, поглощаемой СЧ от поверхности Земли

По аналогии с солнечным излучением, эффективное число мод излучаемых Землей и поглощаемых частицей находящейся на расстоянии 85 км от Земли равно

$$M_{EP}(D) = \frac{\pi D^2 \Omega_{PE}}{4 \left(\frac{c}{\nu}\right)^2}. \quad (11)$$

Пусть  $\Psi2_{EP}(D, T_E)$  – энергия мод, облучающих поверхность полусферы графитовой частицы в телесном угле  $\Omega_{PE} = \pi$ .

$$\Psi_{2_{EP}}(D, T_E) = 2P_0(v, T_E) \times M_{EP}(D) \quad (12)$$

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

тура поверхности Земли.

Множитель 2 в формуле (12) учитывает две возможные поляризации мод. Рассчитаем  $\Phi_{2_{EP}}(D, T_E)$  – мощность, поглощаемую половиной сферической поверхности этой частицы.

$$\Phi_{2_{EP}}(D, T_E) = \varepsilon_i \times \int_{v_1}^{v_2} \Psi_2(D, T_E) dv, \quad (13)$$

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

Ранее мы использовали формулу из [20] для расчёта эффективного числа мод, облучающих поверхность полусферы СЧ, по следующему выражению:

$$Ma_{EP}(D) = \begin{cases} \frac{S_{csa} \Omega v^2}{c^2} \text{ if } \frac{S_{csa} \Omega v^2}{c^2} \geq 1 \\ \left(\frac{2D}{c}\right)^2 \text{ if } < 1 \\ \frac{c}{v} \end{cases} \quad (14)$$

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

$$\Psi_{2a_{EP}}(D, T_E) = 2P_0(v, T_E) \times Ma_{EP}(D) \quad (15)$$

$$\Phi_{2a_{EP}}(D, T_E) = \varepsilon_i \times \int_{v_1}^{v_2} \Psi_{2a}(D, T_E) dv. \quad (16)$$

### 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;

$\rho$  – удельный вес испаряемого вещества, в кг/м<sup>3</sup>;

$t(D, T1)$  – 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/с;

$M$  – молярная масса вещества частицы.

Удаление массы материала с поверхности частицы вследствие сублимации можно рассчитать, используя формулу Кнудсена–Ленгмюра в пренебрежении обратным потоком конденсации [27, 28].

Тогда получим:

$$\Gamma(D, T1) = 5 \times 10^{14} P_{Tor}(T1) \sqrt{\frac{M}{T1}} \times \frac{\pi D^2}{10} \quad (17)$$

где

$$P_{Tor}(T1) = 5 \times 10^{14} \exp\left(-\frac{90000}{T1}\right) \times \frac{1}{133,322} \quad (18)$$

$$t(D, T1) = \frac{\rho \frac{\pi D^3}{6}}{\Gamma(D, T1)} \quad (19)$$

$$\Phi_e(D, T1) = Q \times \Gamma(D, T1) \quad (20)$$

### 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 части-

цы с молекулой;

$g$  – ускорение свободного падения;

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

Тогда [29]:

$$\Phi_{pm}(D) = \frac{3}{2} k (T1 - T_m) v_m N_m \sigma_{pm}(D) \quad (21)$$

где  $v_m = \sqrt{\frac{8kT_m}{\pi m}}$  (22)

$$N_m = \frac{P_m}{kT_m} \quad (23)$$

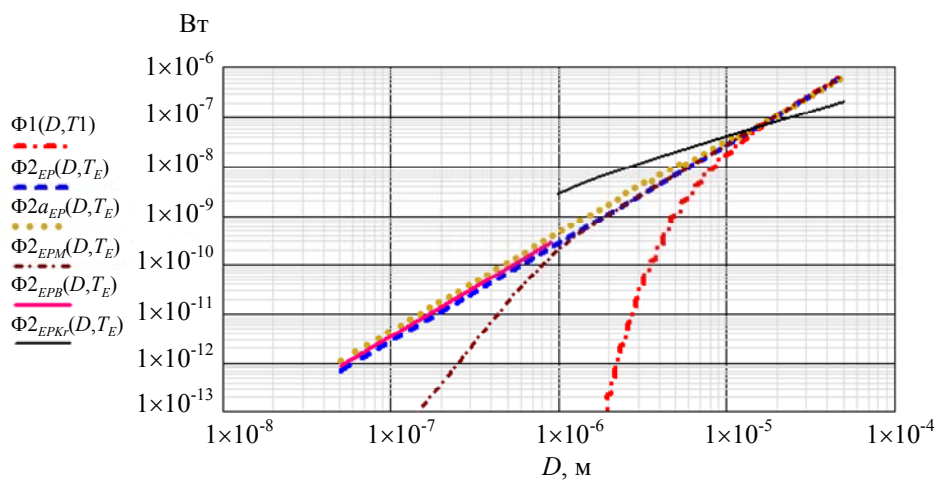
$$P_m = 10^5 \exp\left(-\frac{mgz}{kT_m}\right) \quad (24)$$

$$\sigma_{pm}(D) = \frac{\pi D^2}{4} \quad (25)$$

Зависимости  $\Phi_{pm}(D)$  показаны на рис. 2 и 3. Расчеты проводились при  $T_m = 190$  K [16].

### Результаты расчетов

На рис. 1 (для сравнения) приведены зависимости от величины диаметра СЧ значения мощности, поглощаемой частицами из углерода (графит, сажа), от излучения Земли, рассчитанные по разным методикам. На этом же рисунке приведена зависимость  $\Phi1(D, T1)$  – мощность, излучаемая графитовой частицей нагреваемой излучением Земли. Во всех случаях температура поверхности Земли  $T_E$  принималась равной 300 K.



**Рис. 1.**  $\Phi1(D, T1)$  – зависимость мощности, излучаемой графитовой частицей, рассчитанная при  $T1 = 216$  K.  $\Phi2_{EP}(D, T_E)$  – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицей, рассчитанная по методике, описанной в настоящей работе (см. формулу (13)).  $\Phi2_{aEP}(D, T_E)$  – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицей, рассчитанная по методике, описанной в настоящей работе (см. формулу (16)).  $\Phi2_{EPM}(D, T_E)$  – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицы, рассчитанной по методу, основанному на учете глубины проникновения излучения в материал СЧ.  $\Phi2_{EPB}(D, T_E)$  – зависимость мощности, поглощаемой сферической частичкой сажи.  $\Phi2_{EPKr}(D, T_E)$  – зависимость мощности, поглощаемой графитовой частицей

При расчете  $\Phi2_{EPM}(D, T_E)$  использовались данные, полученные из обработки гра-

фиков, приведенных в [30]. При расчете  $\Phi2_{EPB}(D, T_E)$ , использовалось асимптотичес-

кое приближение предложенное в [18, 19, 31]. По данным, приведенным в [32] были получены зависимости для действительной и мнимой части комплексного показателя преломления сажи. Расчет проводился по формулам (13–17), приведенным в [20]. При расчете зависимости  $\Phi_{2_{EPKr}}(D, T_E)$  использовался метод, основанный на учете глубины проникновения излучения в материал СЧ.

Приведенные зависимости показывают возможный диапазон разбросов результатов расчетов, вызванных несовершенством методик и погрешностями величин исходных данных.

Нам представляется, что выражение  $\Phi_{2_{EP}}(D, T_E)$  наиболее адекватно и естественно описывает зависимость мощности, поглощаемой СЧ от излучения земной поверхности. Из совпадения зависимостей  $\Phi_{2_{EP}}(D, T_E)$  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  $216 \text{ K}$ .

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:

$$\Phi_1\Sigma(D, T_1) = \Phi_{2\Sigma}(D, T_S, T_E) \quad (26)$$

где

$$\Phi_1\Sigma(D, T_1) = \Phi_1(D, T_1) + \Phi_e(D, T_1) + \Phi_{pm}(D) \quad (27)$$

$$\Phi_{2\Sigma}(D, T_S, T_E) = \Phi_2(D, T_S) + \Phi_{2_{EP}}(D, T_E) \quad (28)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 2–4 в виде зависимостей  $\Phi_1(D, T_1)$ ,  $\Phi_{2\Sigma}(D, T_S, T_E)$ ,  $\Phi_e(D, T_1)$ ,  $\Phi_1\Sigma(D, T_1)$ ,  $\Phi_{pm}(D)$ ,  $T_1(D)$  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  $24 \text{ г/моль}$  и  $Q = 30 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$  [27].

Из приведенных на рис. 2 зависимостей видно, что при  $D \gtrsim 1 \times 10^{-5} \text{ м}$  частицы под действием солнечного и земного излучения нагреваются до равновесной температуры  $300 \text{ K}$ , 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  $D \lesssim 1 \times 10^{-5} \text{ м}$   $\Phi_1\Sigma(D, T_1)$  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.

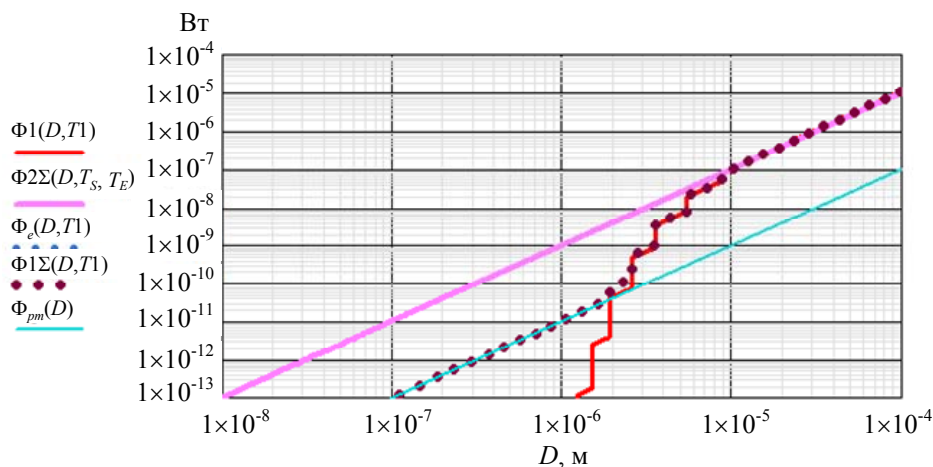
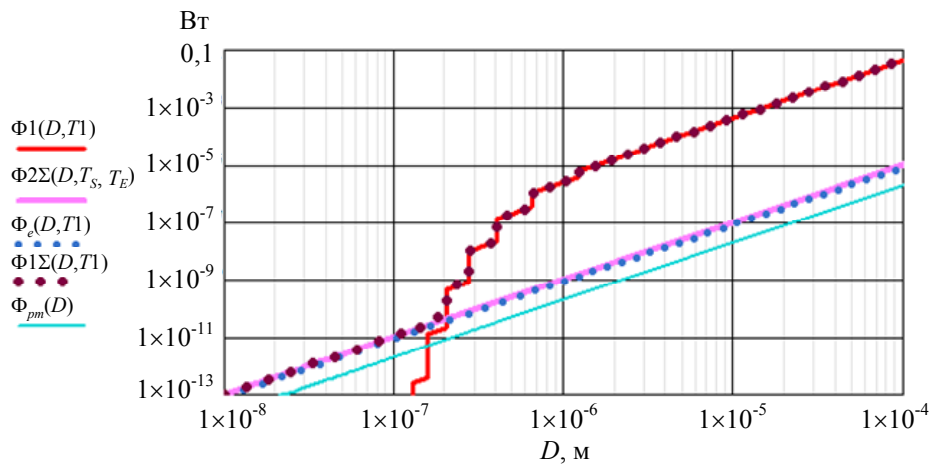


Рис. 2. Зависимости  $\Phi_1(D, T_1)$ ,  $\Phi_{2\Sigma}(D, T_S, T_E)$ ,  $\Phi_1\Sigma(D, T_1)$  и  $\Phi_{pm}(D)$  от диаметра СЧ, рассчитанные при  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $T_S = 5780 \text{ K}$ ,  $T_E = 273 \text{ K}$ ,  $z = 85 \text{ км}$ ,  $T_m = 190 \text{ K}$  и  $\varepsilon_i = 0,77$

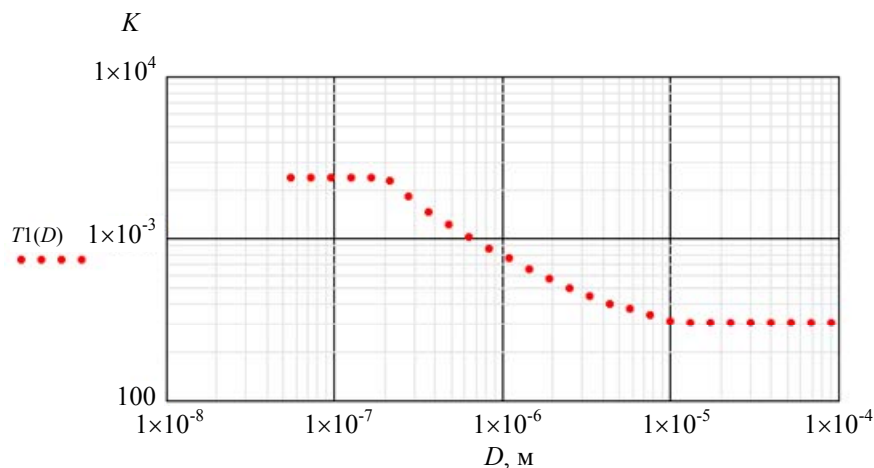


**Рис. 3.** Зависимости  $\Phi_1(D, T_1)$ ,  $\Phi_{2\Sigma}(D, T_s, T_E)$ ,  $\Phi_e(D, T_1)$ ,  $\Phi_{1\Sigma}(D, T_1)$  и  $\Phi_{pm}(D)$  от диаметра СЧ, рассчитанные при  $T_1 = 2385 \text{ K}$ ,  $T_s = 5780 \text{ K}$ ,  $T_E = 273 \text{ K}$ ,  $z = 85 \text{ км}$ ,  $T_m = 190 \text{ K}$  и  $\varepsilon_i = 0,77$

Например, из приведенных на рис. 3 зависимостей, следует, что при  $z = 85 \text{ км}$  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  $D \approx 2 \times 10^{-7} \text{ м}$  при температуре частиц  $T_1 = 2385 \text{ K}$ .

На рис. 4 приведена зависимость  $T_1(D)$  – температуры СЧ, находящейся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. При любых  $D \gtrsim 1 \times 10^{-5} \text{ м}$  равенство тепловых потоков  $\Phi_{2\Sigma}(D, T_s, T_E)$  и  $\Phi_{1\Sigma}(D, T_1)$  достигается при температуре частиц  $T_1 = 300 \text{ K}$ . Од-

нако, на участке  $2 \times 10^{-7} \text{ м} \approx D \approx 1 \times 10^{-5} \text{ м}$  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  $5 \times 10^{-8} \text{ м} \approx D \approx 2 \times 10^{-7} \text{ м}$  практически перестает возрастать при уменьшении диаметров СЧ и стабилизируется, достигнув максимальной величины около  $2385 \text{ K}$ . Отметим, что температура частиц, нагреваемых только солнечным излучением (без учета излучения Земли), была бы:  $283 \text{ K}$  (при  $D \gtrsim 1 \times 10^{-5} \text{ м}$ ) и  $2337 \text{ K}$  (при  $5 \times 10^{-8} \text{ м} \approx D \approx 2 \times 10^{-7} \text{ м}$ ).



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

Расчеты по соотношениям (17–20) показывают, что время сублимации (время жизни) частиц очень сильно зависит от их диаметра, что в первую очередь обусловлено очень сильной зависимостью скорости испарения от температуры. Из расчетов также 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 секунд, т. е. частицы с  $D \approx 3 \times 10^{-7}$  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 проводит селекцию межпланетной пыли по размерам и составу. На расстояниях от Солнца около 1 А.Е. выживают графитовые частицы с размерами, превышающими единицы микрон. Частицы из материалов, имеющих меньшую температуру сублимации, уничтожаются еще более эффективно.

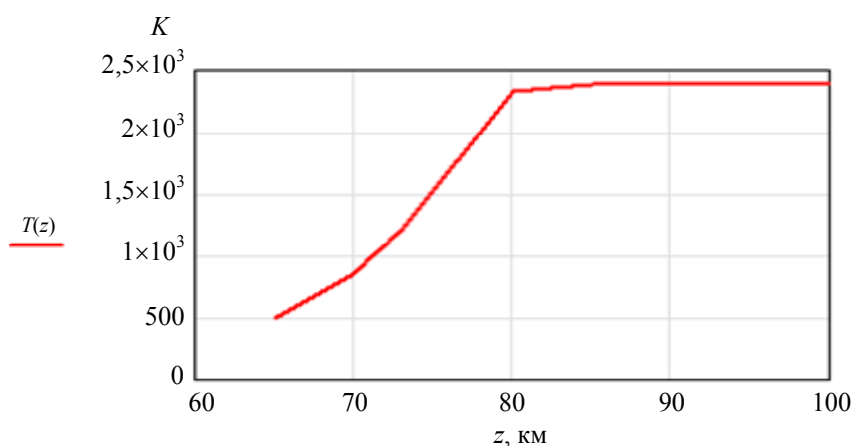


Рис. 5. Зависимость температуры наночастиц углерода от  $z$ -расстояния от поверхности Земли, рассчитанная при  $T_s = 5780$  K,  $T_E = 273$  K, и  $\epsilon_i = 0,77$

Из рис. 5 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  $z \approx 85 \text{ км}$ , когда дальнейший рост температуры ограничивается возрастающей скоростью сублимации.

### Выводы

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

– углеродные частицы с размерами меньшими  $2 \times 10^{-7}$  м нагреваются до температур 2385 K, сублимируются и перестают су-

ществовать. (Температура плавления графита  $3850 \pm 50$  °С, однако его сублимация – интенсивное испарение в вакууме – начинается при 2200 °С);

– 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.

На этом основании можно утверждать, что 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 [6, 22], т. к. частицы не могут излучать свет с длинами волн большими длины волны отсечки  $\lambda_{\text{cutoff}} = 2,221 \times D$ . Например, при  $D = 0,25$  мкм,



$\lambda_{\text{cutoff}} = 0,555$  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  $D = 0,2$  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.

Из литературных данных следует, что на высотах 80–130 км входящие в атмосферу метеорные тела претерпевают процесс абляции – дробления, испарения и распыления, а частицы межпланетной и межзвёздной пыли с размерами от 0,1 мкм до 25–40 мкм в результате столкновений с молекулами воздуха быстро замедляются (на высотах  $\sim 100$  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  $10 \text{ см}^{-3}$ , а на высотах 85–90 км от 100 до  $1000 \text{ см}^{-3}$  [4].

Предложенная нами гипотеза хорошо объясняет диапазон высот, на которых наблюдаются серебристые облака. Из графика на рис. 5 видно, что частицы достигают температур, при которых начинается видимое свечение ( $T > 900 \text{ K}$ ) на 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 73–95 км и наблюдаются серебристые облака.

Таким образом, гипотеза о природе Серебристых облаков состоит в том, что **серебристые облака представляют собой скопления раскаленных наночастиц.**

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Вибе Д. З., Столяров А. В.* Астрохимия. ХИМФАК МГУ [Электронный ресурс]. URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/astrochemistry-M.pdf?ysclid=lh0ks5qmai940368546> (дата обращения: 27.05.2023).
2. *Сурдин В. Г.* Серебристые облака. ГАИШ, Москва [Электронный ресурс]. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1214909> (дата обращения: 27.05.2023).
3. *Бронштэн В. А.* Серебристые облака и их наблюдение. – М.: Наука, 1984.
4. *Bailey S. M., Hervig M. E., Randall C. E.* / Reviews of Geophysics. 2017. Vol. 55 (4). P. 902–944.
5. Серебристые облака [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/25217/> (дата обращения: 27.05.2023).
6. *Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д.* / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 42–51.
7. Метеорное вещество в Солнечной системе [Электронный ресурс]. URL: [https://dzen.ru/a/X8aJdW1Oalw\\_3aQt](https://dzen.ru/a/X8aJdW1Oalw_3aQt) (дата обращения: 27.05.2023).
8. Мезосфера Земли: описание и свойства [Электронный ресурс]. URL: <https://naturae.ru/atmosfera-zemli/stroenie-atmosfery/mezosfera.html> (дата обращения: 27.05.2023).
9. *Огурицов М. Г.* / Труды 31-й Всероссийской конференции по космическим лучам. Москва, МГУ, 5–9 июля 2010. – М.: МГУ, 2010. С. 1–5.
10. *Ермаков В. И., Охлопков В. П., Стожков Ю. И.* / Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 5. С. 41–45.
11. *Мазеева О. А.* / Астрономический вестник. 2004. Т. 38. № 4. С. 372–382.
12. *Попель С. И.* / Природа. 2015. № 9. С. 48–56.
13. *Попель С. И.* Мелкодисперсные частицы и пылевая плазма в гелиогеофизике. Плазменная гелиогеофизика / под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. – М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 368–390.
14. *Coulson S. G.* / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2003. Vol. 343. № 4. P. 1123–1130. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06478.x>
15. *Love S. G., Brownlee D. E.* / Icarus. 1991. Vol. 89. № 1. P. 26–43.
16. *Патинская В.* Атмосфера Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://spacegid.com/atmosfera-zemli.html> (дата обращения: 27.05.2023).
17. *Gustafson B. A. S.* / Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1994. Vol. 22. P. 553–595. doi: 10.1146/annurev.earth.22.050194.003005
18. *Van de Hurst H. C.* Light Scattering by Small Particles. – New York: Wiley, 1957.
19. *Wickramasinghe N. C.* Light Scattering by Small Particles. – New York: Wiley, 1973.
20. *Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д.* / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 44–55.
21. *Krugel E.* The Physics of Interstellar Dust. – Bonn: IOP Publishing Ltd., 2003.
22. *Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д.* / Прикладная физика. 2021. № 2. С. 12–21.

23. Sviridov A. N., Saginov L. D. / Journal of communications technology and electronics. 2022. Vol. 67. Suppl. 1. P. 891–896. doi: 10.1134/S1064226922130095
24. Фридрихов С. А., Мовнин С. М. Физические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1982.
25. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь – М.: Связь, 1978.
26. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988.
27. Еришов А. В., Нежданов А. В. Напыление тонких пленок испарением в вакууме. Практикум. – Н. Новгород: НГУ им. Н. И. Лобачевского, 2020.
28. Майселл Л., Гленг Р. Технология тонких пленок. Справочник том 1. – М.: Советское радио, 1977.
29. Смирнов Б. М. / УФН. 1997. Т. 167. № 11. С. 1169–1200.
30. Мартыненко Ю. В., Огнев Л. И. / ЖТФ. 2005. Т. 75. № 11. С. 130–132.
31. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986.
32. RefractiveIndex.INFO [Электронный ресурс]. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=C&page=Phillip> (дата обращения: 26.05.2023).

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

## About the nature of Silvery clouds

A. N. Sviridov and L. D. Saginov

FSAC VIM

5 1st Institutsky proezd, Moscow, 109428, Russia

E-mail: sviridtol@yandex.ru

Received 17.05.2023; accepted 20.06.2023

***The dynamics of the temperature of particles with a characteristic size of  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  m at the boundary of the Earth's atmosphere and outer space is considered. Using graphite as an example, it is shown that at an altitude of 80–90 km from the earth's surface, particles with a size of  $\sim 5 \times 10^{-7}$  m or less can be heated above the temperature of the beginning of the glow ( $\sim 900$  K), reaching temperatures of more than 2000 K with a light turquoise glow. Based on the results obtained, it is concluded that the silvery clouds observed in the false dawn and after sunset from the Earth's surface are a cluster of white-hot nanoparticles.***

**Keywords:** Kirchhoff's law, radiation coefficient, absorption coefficient, spatial spectral mode, sublimation, interplanetary dust, silvery (mesospheric) clouds.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-5-15

## REFERENCES

1. Vibe D. Z. and Stolyarov A. V., Astrohimiya. HIMFAK MGU [Elektronic resource]. URL: <https://teachin.ru/file/synopsis/pdf/astrochemistry-M.pdf?ysclid=lh0ks5qmai940368546> (date of access: 27.05.2023) [in Russian].
2. Surdin V. G., Serebristye oblaka. GAISH, Moskva [Elektronic resource]. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1214909> (date of access: 27.05.2023) [in Russian].
3. Bronshten V. A., Serebristye oblaka i ih nablyudenie, Moscow, Nauka, 1984 [in Russian].
4. Bailey S. M., Hervig M. E. and Randall C. E., Reviews of Geophysics **55** (4), 902–944 (2017).
5. Serebristye oblaka [Elektronic resource]. URL: <https://www.roscosmos.ru/25217/> (date of access: 27.05.2023) [in Russian].
6. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Applied Physics, № 1, 42–50 (2022) [in Russian].
7. Meteornoie veshchestvo v Solnechnoj sisteme [Elektronic resource]. URL: [https://dzen.ru/a/X8aJdW1Oalw\\_3aQt](https://dzen.ru/a/X8aJdW1Oalw_3aQt) (date of access: 27.05.2023) [in Russian].
8. Mezosfera Zemli: opisanie i svoystva [Elektronic resource] URL: <https://naturae.ru/atmosfera-zemli/stroenie-atmosfery/mezosfera.html> (date of access: 27.05.2023) [in Russian].

9. Ogurcov M. G. Trudy 31 Vserossijskoj konferencii po kosmicheskim lucham. Moscow, MGU, pp. 1–5 (2010) [in Russian].
10. Ermakov V. I., Ohlopkov V. P. and Stozhkov Yu. I., Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 3. Fizika. Astronomiya, № 5, 41–45 (2007) [in Russian].
11. Mazeeva O. A., Astronomical Bulletin **38** (4), 372–382 (2004) [in Russian].
12. Popel S. I., Priroda, № 9, 48–56 (2015) [in Russian].
13. Popel S. I. Melkodispersnye chasticy i pylevaya plazma v geliogeofizike / Plazmennaya geliogeofizika / pod red. L. M. Zelenogo, I. S. Veselovskogo, **2**, 368–390 (2008) [in Russian].
14. 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>.
15. Love S. G. and Brownlee D. E., Icarus **89** (1), 26–43 (1991).
16. Patinskas V., Atmosfera Zemli [Elektronic resource]. URL: <https://spacegid.com/atmosfera-zemli.html> (date of access: 27.05.2023) [in Russian].
17. Gustafson B. A. S., Annual Review of Earth and Planetary Sciences **22**, 553–595 (1994), doi: 10.1146/annurev.earth.22.050194.003005
18. Van de Hurst H. C, Light Scattering by Small Particles, New York, Wiley, 1957.
19. Wickramasinghe N. C., Light Scattering by Small Particles, New York, Wiley, 1973.
20. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Applied Physics, № 2, 44–55 (2023) [in Russian].
21. Krugel E. The Physics of Interstellar Dust. Bonn: IOP Publishing Ltd. 2003.
22. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Applied Physics, № 2, 12–21 (2021) [in Russian].
23. Sviridov A. N. and Saginov L. D., Journal of communications technology and electronics **67**, suppl. 1 (2022).
24. Fridrihov S. A. and Movnin S. M., Fizicheskie osnovy elektrotehniki, Moscow, Vysshaya shkola, 1982 [in Russian].
25. Gagliardi R. M. and Karp Sh., Optical Communications, New York-London-Sydney-Toronto, John Wiley & Sons 1976; Moscow, Svyaz', 1978.
26. Goussorgues G., La Thermography Infrarouge. Principes – Technique – Applications, Deuxieme.edition, Paris, Technique et Documentation Lavoister, 1984, Moscow, MIR, 1988.
27. Ershov A. V. and Nezhdanov A. V., Napylenie tonkih plenok isparenim v vakuume. Praktikum. N. Novgorod: NGU im. N. I. Lobachevskogo, 2020 [in Russian].
28. Maissel L. and Glang R., Handbook of Thin Film Technology, Sovetskoe radio **1** (1970).
29. Smirnov B. M., Uspekhi Fizicheskikh Nauk **167** (11), 1169–1200 (1997); [in Russian]. Phys. Usp. **40** (11), 1117–1147 (1997) [in English].
30. Martynenko Yu. V. and Ognev L. I., Zhurnal Texnicheskoj Fiziki **75** (11), 130–132 (2005) [in Russian]; Technical Physics **50** (11), 1522–1524 (2005) [in English].
31. Bohren C. F. and Huffmann D. R., Absorbtion and Scattering of Light by Small Particles, New York, Chiches-ter-Brisbane-Toronto-Singapore, John Wiley & Sons, 1983.
32. RefractiveIndex.INFO [Elektronic resource]. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=C&page=Phillip> (date of access: 26.05.2023).