



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

V. N. Lebedinets, The evaluation of the crushing meteoric body densities based on the observed meteor deceleration,
Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1986, Volume 291,
Number 2, 313–316

<https://www.mathnet.ru/eng/dan47733>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.83

April 27, 2025, 19:53:09



В.Н. ЛЕБЕДИНЕЦ

ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ДРОБЯЩИХСЯ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ
ПО НАБЛЮДАЕМОМУ ТОРМОЖЕНИЮ МЕТЕОРОВ*(Представлено академиком К.Я. Кондратьевым 20 IX 1985)*

Авторы работы [1], анализируя торможения и высоты 413 слабых фотографических метеоров, пришли к выводу, что лишь один из них был порожден плотным метеорным телом, а остальные — очень рыхлыми телами со средней плотностью $\delta_0 = 0,26 \text{ г/см}^3$. Авторы исходили из концепции прогрессивного дробления очень рыхлых метеорных тел под действием аэродинамического давления и не учитывали возможность дробления плотных метеорных тел, поэтому их выводы нуждаются в проверке в рамках теории квазинепрерывного дробления метеорных тел, которая в настоящее время представляется наиболее вероятной формой дробления [2—4].

Теоретический расчет торможения дробящегося метеора в произвольной точке его видимой траектории очень сложен, так как требует применения еще не созданной к настоящему времени теории квазинепрерывного дробления, которая учитывала бы распределение масс осколков, торможение родительского метеорного тела (РМТ) и осколков, изменчивость фотометрической структуры светящейся комы метеора. Автором [4] отмечено, что в рамках упрощенной теории на видимой траектории метеора можно выделить два участка, на которых расчет торможения существенно упрощается.

1. На высотах h_1 вблизи высоты появления метеора h_{Π} наблюдаемое торможение метеора \dot{v}_1 должно быть близко к торможению РМТ, следовательно, по \dot{v}_1 можно оценить плотность РМТ на высоте h_1 δ_{01} , если известна масса РМТ на этой высоте M_1 .

2. На высотах h_2 вблизи высоты окончания дробления РМТ $h_{к.д}$ наблюдаемое торможение метеора \dot{v}_2 должно быть близким к торможению крупных осколков, следовательно, по \dot{v}_2 можно определить массу этих осколков m_2 , если известна их плотность δ .

Соответствующие расчетные формулы [4]:

$$\dot{v}_1 = - \frac{\Gamma A \rho_1 v_1^2}{\delta_{01}^{2/3} M_1^{1/3}}, \quad M_1^{1/3} = M_0^{1/3} - \frac{\Lambda A H v_0^2}{6 Q_{\text{д}} \delta_0^{2/3} \cos z} (\rho_1 - \rho_{\text{н.д}}),$$

$$\dot{v}_2 = - \frac{\Gamma' A' \rho_2 v_2^2}{\delta^{2/3} m_2^{1/3}}, \quad \rho_{\text{к.д}} = \rho_{\text{н.д}} + \frac{6 Q_{\text{д}} \delta_0^{2/3} M_0^{1/3} \cos z}{\Lambda A H v_0^2},$$

$$\rho_{\text{к}} = \rho_{\text{к.д}} + \frac{6(Q - Q_{\text{д}}) \delta^{2/3} m_0^{1/3} \cos z}{\Lambda' A' H v_2^2}.$$

Здесь M_0, v_0 — начальная масса и скорость РМТ; Γ, A, Λ — коэффициенты сопротивления, формы и теплопередачи для РМТ; Γ', A', Λ' — те же коэффициенты для осколков; v_1, v_2 — скорость метеора на высотах h_1 и h_2 ; ρ_1, ρ_2 — плотность атмосферы на высотах h_1 и h_2 ; H — приведенная высота однородной атмосферы; z — зенитное расстояние радианта метеора; δ_0 — плотность РМТ; $Q_{\text{д}}$ — удельная энергия дробления РМТ; Q — удельная энергия нагревания и испарения метеорного вещества; $\rho_{\text{н.д}}$ — плотность атмосферы на высоте $h_{\text{н.д}}$ начала дробления РМТ; $\rho_{\text{к.д}}$ — плотность атмосферы на высоте $h_{\text{к.д}}$ окончания дробления РМТ; $\rho_{\text{к}}$ — плотность атмосферы на высоте $h_{\text{к}}$ окончания испарения последнего осколка; m_0 — начальная масса последних осколков.

Согласно формулам для $\rho_{к.д}$ и $\rho_к$ еще одна оценка плотности PMT δ_{02} может быть получена по высоте $h_к$, если известна величина m_0 .

Из фотографических наблюдений метеоров [1] известны величины: $v_0, M_0, v_1, \dot{v}_1, \rho_1, v_2, \dot{v}_2, \rho_2$; высоты появления $h_{п.}$, максимума блеска h_m и исчезновения $h_{и.}$ метеора, а также фотометрические массы метеора $M_{ф1}$ и $M_{ф2}$ на высотах h_1 и h_2 . Величины $\Gamma, \Gamma', A, A', \Lambda, \Lambda', \delta_0, \delta, M_1, m_2$ и m_0 не могут быть непосредственно определены по данным наблюдений. Не известны также высоты $h_{н.д.}, h_{к.д.}$ и $h_к$; они могут быть приближенно оценены или рассчитаны теоретически при введении некоторой априорной информации.

В литературе рассматривается ряд физических механизмов квазинепрерывного дробления метеорных тел разных типов [2, 4–8]:

сдувание расплавленной пленки с поверхности железных PMT;

сброс расплавленной пленки с поверхности PMT типа каменных метеоритов-хондритов за счет испарения летучих примесей ($\text{Na}_2\text{O}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{FeS}, \text{P}$);

сброс поверхностного слоя в твердом состоянии: за счет терморазрушения при изменении структуры кристаллов с температурой – в случае PMT типа каменных метеоритов-хондритов; за счет бурного выделения воды, испарения серы и других летучих компонентов PMT типа углистых хондритов CI;

дробление рыхлых PMT – “комочков пыли” – под действием аэродинамического давления или за счет плавления перемычек между пылинками.

В [4, 9] получены приближенные оценки Q_d для этих механизмов дробления: для первых двух $Q_d = 1,3 \cdot 10^{10}$ эрг/г; для третьего $Q_d = 8 \cdot 10^9$ эрг/г; для комочков пыли $Q_d \lesssim 4 \cdot 10^9$ эрг/г.

Поскольку мы не можем охватить все многообразие характеристик реальных PMT, разобьем их на 5 групп: 1) железные с $\delta_0 = 7,7$ г/см³ и $Q_d = 1,3 \cdot 10^{10}$ эрг/г; 2) железо-каменные с $\delta_0 \approx 5$ г/см³ и $Q_d = 1,3 \cdot 10^{10}$ эрг/г; 3) плотные каменные PMT типа обыкновенных метеоритов-хондритов с $\delta_0 = 3,5$ г/см³ и $8 \cdot 10^9 \leq Q_d \leq 1,3 \cdot 10^{10}$ эрг/г; 4) более рыхлые PMT типа углистых хондритов CI с $\delta_0 = 2$ г/см³ и $Q_d \approx 8 \cdot 10^9$ эрг/г; 5) комочки пыли с $\delta_0' \lesssim 1$ г/см³ и $Q_d \lesssim 4 \cdot 10^9$ эрг/г. В результате математического моделирования торможения и высот метеоров будем относить PMT к одному из этих типов.

Необходимо также задать величины $\Lambda, \Lambda', A, A', \Gamma, \Gamma', \delta, Q$. Для дробящихся PMT с $M_0 < 1$ г и для осколков с $m_0 \ll 1$ г можно принять $\Lambda = \Lambda' = 1$ и “модель В” зависимости коэффициента светимости τ от скорости метеора v [4, 5]. Согласно [4] примем $A = 1,5$ и $A' = 1,21$. Для осколков железных PMT примем $\delta = 7,7$ г/см³; для осколков железо-каменных $3,5 < \delta < 7,7$ г/см³; для осколков обыкновенных метеоритов-хондритов $\delta = 3,5$ г/см³; для осколков углистых хондритов и комочков пыли примем плотность $2,65$ г/см³, близкую к плотности SiO_2 – наиболее обильного из тугоплавких компонентов углистых хондритов. Для всех типов PMT примем согласно [5] $Q = 8 \cdot 10^{10}$ эрг/г. Учитывая, что роль реактивного эффекта испаряющихся молекул относительно невелика как в случае дробящихся PMT, так и в случае осколков, примем согласно [4] $\Gamma = \Gamma' = 1 + 0,012v$ (v в км/с).

Поскольку $h_{н.д.}$ несколько больше $h_{п.}$, а наш расчет потери массы PMT может быть неточным, будем рассматривать три значения массы PMT на высоте h_1 : $M_{ф1}$, равное суммарной массе PMT и осколков (максимальная оценка); M_1 , вычисленное при $h_{н.д.} = h_{п.}$, – M_1 (наиболее вероятная оценка); M'_1 , вычисленное при $\rho_{н.д.} = 0$, – M'_1 (минимальная оценка). Соответствующие расчетные значения торможения PMT на высоте h_1 обозначим $\dot{v}_{1ф.}, \dot{v}_1$ и \dot{v}'_1 . Наблюдаемое торможение метеора $\dot{v}_{1н.}$ должно быть заключено между $\dot{v}_{1ф.}$ и \dot{v}'_1 . Путем математического моделирования мы оценили, что в качестве исходного критерия “близости h_1 к $h_{п.}$ ” можно принять $M_{1ф.} \geq 0,7M_0$.

Первоначальный отбор высот $h_2 \lesssim h_{к.д.}$ проводился нами по резкому возрас-

Таблица 1

№ по [1]	u_0 , км/с	M_0 , г	h_1 , км	M_1 , г	$-\dot{v}_{1H}$, км/с ²	$-\dot{v}_1$, км/с ²	$\delta_{01} = \delta_{02}$, г/см ³	h_2 , км	$m_2 \times 10^3$, г	$\bar{m}_0 \times 10^3$, г	$h_{K.D.}$, км	Метеорный поток
4141	17	0,41	81	0,16	1,04	1,10	2	78	0,6	0,1	78	
4153	21	0,44	91	0,08	0,45	0,62	1	86	0,1	0,01	88	
4351	25	0,22	88	0,05	0,98	1,13	2	83	7	1	86	
4388	16	0,36	80	0,05	1,23	1,79	2	74	10	3	78	
4701	30	0,13	91	0,01	1,50	1,96	2	87	1	0,8	90	S Таурид
4952	12	0,55	74	0,18	1,10	0,88	2	71	8	0,1	71	
4964	16	0,28	89	0,07	0,63	0,50	1	85	0,03	0,01	86	
5332	23	0,19	87	0,04	1,10	1,29	2	80	3	1	84	
6491	23	0,35	85	0,21	0,67	0,67	3,5	77	9	1	78	
6949	27	0,82	92	0,60	0,29	0,23	3,5	80	7	2	81	Виргинид
7744	20	0,18	81	0,06	1,06	0,92	7,7	76	1	0,1	78	
7750	17	0,11	82	0,04	1,18	0,96	3,5	80	0,5	0,001	80	
7820	19	0,78	86	0,40	0,48	0,41	2	78	3	0,1	77	
7871	26	0,23	92	0,05	0,80	0,62	2	88	0,3	0,1	89	
7944	22	0,37	89	0,10	0,74	0,57	2	84	1	0,3	84	
8075	38	0,23	91	0,14	0,46	0,56	7,7	82	0,5	0,1	83	Нс-Акварид
8244	16	0,30	84	0,12	0,82	0,68	2	75	4	1	78	
8447	21	0,32	91	0,13	0,37	0,33	2	86	0,4	0,05	86	
8546	19	0,59	84	0,27	0,38	0,53	5	73	2	2	74	
8945	31	0,09	95	0,03	0,99	0,65	2	88	0,4	0,4	91	S Таурид
9015	31	0,47	93	0,33	0,41	0,32	5	79	0,2	0,2	79	S Таурид
9900	24	0,44	88	0,20	0,57	0,47	3,5	80	20	4	80	
9953	43	0,11	96	0,04	0,88	0,78	3,5	94	0,06	0,01	94	Квадрантид
10358	29	0,17	92	0,03	0,91	1,08	2	86	0,6	0,6	88	
12577	30	0,58	95	0,31	0,46	0,31	2	85	0,8	0,8	88	

танию наблюдаемого торможения метеоров вблизи $h_{к.д.}$. Кроме оценки по торможению метеора на высоте h_2 массы крупных осколков m_2 , мы смогли также оценить некоторую среднюю эффективную массу осколков \bar{m}_0 из условий $\delta_{01} = \delta_{02}$ и $h_{к.д.} = h_{и.}$. Так как в действительности $h_{к.д.}$ на 1–3 км ниже $h_{и.}$, полученные таким образом значения \bar{m}_0 должны быть меньше m_2 , что в действительности обычно и наблюдается. При уменьшении $h_{к.д.}$ на 1–3 км по сравнению с $h_{и.}$ величина \bar{m}_0 приближается к m_2 .

В каталоге [1] оказалось 25 метеоров, для которых: приведены торможения в обоих интервалах высот h_1 и h_2 ; оценки δ_{01} и δ_{02} могут быть согласованы между собой при $\bar{m}_0 \lesssim m_2$; $M_0 < 1$ г. Некоторые из результатов расчетов приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, наиболее распространенными типами РМТ являются тела, сходные с углистыми хондритами С1 и обыкновенными каменными метеоритами-хондритами. Доля очень рыхлых тел — комочков пыли — невелика и сравнима с долей железных и железо-каменных тел. Эти результаты находятся в резком противоречии с выводами Яккья и др. [1] и качественно согласуются с оценками δ_0 рядом авторов [9–12] по наблюдаемым высотам метеоров, однако оценки δ_0 по одним лишь высотам метеоров без привлечения информации о торможении метеоров значительно менее надежны. Наиболее интересным из полученных нами результатов является весьма уверенное обнаружение очень плотных метеорных тел, в том числе железных и железо-каменных, как среди спорадических метеорных тел, так и в метеорных роях, генетическая связь которых с кометами в настоящее время считается общепризнанной. Это указывает на существование генетической связи с кометами по крайней мере некоторой части метеоритообразующих тел.

Институт экспериментальной метеорологии
Обнинск Калужской обл.

Поступило
2 XII 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jacchia L.G., Verniani F., Briggs R.E.* — *Smithson. Contrib. Astrophys.*, 1967, vol. 10, № 1, p. 1–139.
2. *Левин Б.Ю.* — *Астрон. журн.*, 1963, т. 40, № 2, с. 304–311.
3. *Симошенко А.Н.* — *Метеоритика*, 1973, № 32, с. 50–64.
4. *Лебединец В.Н.* Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. Л.: Гидрометеониздат, 1980.
5. *Öpik E.J.* *Physics of meteor flight in the atmosphere.* N.Y.; L.: Intersci. 1958.
6. *Cook A.F., Jacchia L.G., McCrosky R.E.* — *Smithson. Contrib. Astrophys.*, 1963, vol. 7, p. 209–220.
7. *Jones J., Kaiser T.R.* — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1966, vol. 133, № 4, p. 411–420.
8. *Салимов О.Н., Константинов И.Е., Михеенко С.Г.* — *Астрон. вестн.*, 1979, т. 13, № 1, с. 50–55.
9. *Новиков Г.Г., Лебединец В.Н., Блохин А.В.* — Письма в астрон. журн., 1984, т. 10, № 10, с. 785–790.
10. *Ceplesha Z.* *Spec. Rep. № 279*, *Smithson. Astrophys. Observ.*, Cambridge, Mass., 1968.
11. *Ceplesha Z.* — *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 1975, vol. 26, p. 242–248.
12. *Калениченко В.В.* — *Астрон. вестн.*, 1982, т. 16, № 4, с. 216–222.