

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
МЕЖПЛАНЕТНОГО ВЕЩЕСТВА С ПОМОЩЬЮ РАКЕТ
И ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ**

С. М. Полосков, Т. Н. Назарова

Изучение метеорного вещества, приходящего в земную атмосферу из межпланетного пространства, ранее всегда считалось астрономической проблемой. В настоящее время стало очевидным, что исследование этого вопроса представляет большой интерес для геофизики (выяснение роли метеорных частиц в физических процессах, происходящих в атмосфере, в частности в образовании спорадического слоя *E*, серебристых облаков, свечении атмосферы и пр.), а также для некоторых задач прикладного характера, в частности для задач, связанных с изучением условий движения в высоких слоях атмосферы ракет и искусственных спутников Земли. Наиболее актуальными задачами, которые должны быть решены на первом этапе исследований, являются следующие:

1. Определение потока метеорных частиц.
2. Изучение спектра их энергий. Было бы очень существенно расшифровать спектр энергий частиц в потоке, определив отдельно спектр масс и спектр скоростей.

Исследование твердой составляющей межпланетного вещества производится прямыми (с помощью ракет) и косвенными методами. К косвенным методам мы будем относить астрономические методы изучения метеорных тел, вторгающихся в земную атмосферу из межпланетного пространства, а также различные методы изучения метеорного вещества, выпадающего на поверхность Земли.

Сведения о твердой составляющей межпланетного вещества, которыми мы располагаем в настоящее время, получены косвенными методами. Заранее, однако, надо сказать, что сколько-нибудь удовлетворительных данных в настоящее время нет. Данные, полученные разными способами и разными авторами, плохо согласуются между собой. Надежные данные, по-видимому, можно получить только прямыми методами: с помощью ракет, а особенно с помощью искусственных спутников Земли, пребывающих длительное время в верхней атмосфере. Однако в настоящее время прямыми методами получены лишь единичные данные. Имеющиеся сведения не могут дать ответ на поставленные выше вопросы, что и вызывает настоятельную необходимость постановки этой проблемы как одной из научных задач для ракетных исследований.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ

Данные о твердой компоненте межпланетного вещества могут быть получены путем: а) наблюдений внешней короны Солнца (так называемой фраунгоферовой составляющей внешней короны), противостояния и зодиакального света; б) наблюдений метеоров; в) изучения метеорного вещества, выпадающего на поверхность Земли.

а) Изучение фFraунгоферовой составляющей
внешней короны Солнца, противосияния
и зодиакального света

Данные, получаемые из этих наблюдений, обладают тем общим недостатком, что не позволяют делать уверенных заключений о концентрации межпланетной пыли на земной орбите. Например, очень трудно отделить в зодиакальном свечении компоненту, вносимую рассеянием на твердых частицах, от компоненты, обусловленной рассеянием на свободных электронах.

Ранее предполагалось, что за поляризацию ответственны только электроны, причем электронная концентрация определялась по степени поляризации. Однако Ван де Холст показал¹, что поляризация, обусловленная твердыми частицами, будет того же порядка (около 20%), что и поляризация, создаваемая электронами.

На основании изучения внешней короны и зодиакального света плотность твердой компоненты на расстоянии от Солнца, равном радиусу земной орбиты, оценивается как $10^{-23} \leq \rho \leq 10^{-21} \text{ г/см}^3$, причем эта оценка является, как уже говорилось, очень неопределенной.

Рядом исследователей^{1,2} были получены противоречивые данные о пространственной плотности пылевого вещества в окрестностях земной орбиты на основании фотометрических исследований F -составляющей солнечной короны. Так, Ван де Холст¹ оценил объемную плотность окружающего Солнце метеорного облака ρ в $5 \cdot 10^{-21} \text{ г/см}^3$ в предположении, что плотность

Таблица I

Автор	$\rho, \text{ г/см}^3$
В. Г. Фесенков (1947 г.)	$6 \cdot 10^{-23}$
Аллен (1947 г.)	$4 \cdot 10^{-23}$
Ван де Холст (1947 г.)	$3 \cdot 10^{-21}$
Бэр и Зидентопф (1953 г.)	$\sim 10^{-23}$
Эльзессер (1954 г.)	$2 \cdot 10^{-23}$
Минарт (1955 г.)	$\sim 6 \cdot 10^{-23}$
Зидентопф (1955 г.)	$2-4 \cdot 10^{-22}$

частиц составляет 5 г/см^3 . На основании фотометрических данных и теории рассеяния света на пыли Ван де Холст нашел функцию распределения частиц в облаке по их размерам. Эта функция имеет вид

$$n(a) = Ca^{-2,6}, \quad (1)$$

где a — радиус частицы, C — постоянная. При этом предполагается, что альбедо

частиц $= 0,1$, частиц с размерами больше 1 мкм меньше, чем это следует из формулы (1), и что $C \approx 10^{-20}$ при $r = 1$ астрономической единице (у орбиты Земли) и $C \approx 5 \cdot 10^{-20}$ при $r = 1/2 \text{ а. е.}$

Средний свободный путь, по Ван де Холсту, для межпланетных частиц равен 10^6 а. е. Толщина метеорного облака в направлении, перпендикулярном к эклиптике, равна $0,1 \text{ а. е.}$ и, следовательно, масса частиц в пределах орбиты Земли составляет всего лишь $5 \cdot 10^{18} \text{ г}$, т. е. равна массе большой кометы и в миллиард раз меньше массы Земли.

По оценке Ван Рейна² объемная плотность метеорного облака $\rho = 5 \cdot 10^{-18} \text{ г/см}^3$, т. е. на три порядка больше, чем у Ван де Холста.

Это расхождение, по мнению Ван де Холста, объясняется различием в установлении размера частиц, эффективно рассеивающих зодиакальный свет. По Ван Рейну эти частицы имеют средний радиус 50 см , тогда как Ван де Холст считает, что их радиус в 1000 раз меньше.

Критический обзор результатов, касающихся данных о пространственной плотности пылевого вещества в окрестностях земной орбиты и полученных рядом исследователей на основании фотометрических исследований F -составляющей солнечной короны, содержится в монографии Б. Ю. Левина³. В таблице I сведены вместе эти результаты.

б) Наблюдение метеоров

На первый взгляд кажется, что именно наблюдения метеоров оптическими радиолокационными методами являются наиболее надежным средством изучения поставленных выше вопросов. Эти методы, несомненно, представляют большую ценность, в частности, для решения ряда геофизических вопросов, как-то: образование спорадического слоя E , определение структурных параметров атмосферы и т. д. Однако в настоящее время они не позволяют получить интересующие нас данные о потоке метеорных частиц и их энергии.

В самом деле, изучая движение метеоров в земной атмосфере, следует помнить, что существует ряд факторов, искажающих истинную картину движения метеорных тел за пределами земной атмосферы. Главнейшие из них: искажение движения, связанное с прохождением частиц через плотную земную атмосферу, и наблюдательная селекция.

Наиболее мелкие метеорные частицы, обладающие первоначальной скоростью 11—70 км/сек по отношению к Земле, могут полностью затормозиться в атмосфере, и дальнейшее их движение будет совершаться под действием силы тяжести. Для частиц с размерами порядка микрона и менее движение приобретает такой характер, по-видимому, уже с высот ~ 80 —90 км. При этом астрономическим и радиолокационным наблюдениям доступны только сравнительно крупные частицы, образующие при своем прохождении через атмосферу явления метеоров. Для суждения о частицах более мелких приходится прибегать к экстраполяциям, более или менее обоснованным.

В настоящее время оптической (визуальной и фотографической) регистрации поддаются лишь метеоры, яркость которых заключена в интервале звездных величин $+4 < m < -4$ для наблюдений невооруженным глазом и $+4 < m < 11$ для телескопических наблюдений.

Вследствие малой продолжительности явления и, следовательно, вынужденной кратковременности экспозиций фотографическим путем могут быть обнаружены лишь очень яркие метеоры. Радиолокационный метод позволяет зарегистрировать метеоры, которые имеют яркость до $+12^m$. В этом случае метеоры обнаруживаются по создаваемому ими электронному треку, т. е. столбу ионов с концентрацией, на несколько порядков превышающей ионосферный фон.

В метеорной астрономии получена формула, связывающая яркость метеора с массой частицы и ее скоростью. Эта формула для метеорного тела, движущегося со скоростью $v = 56$ км/сек, имеет следующий вид:

$$\lg M = -1,1 - 0,4 m_z, \quad (2)$$

где M — масса метеора, m_z — яркость, приведенная к зениту. Следовательно, метеор второй величины будет иметь массу около 0,01 г.

Если задаться некоторым значением средней плотности метеорного тела, то можно по этой формуле определять его размеры. Например, при $\rho_{\text{част}} = 5$ г/см³ имеем

$$\lg a = -0,8 - 0,133 m_z.$$

В таблице II (столбцы 1, 2 и 3) приведены видимые яркости метеоров и вычисленные по формуле (2) соответствующие им массы метеорных тел и их радиусы.

Рассмотрение таблицы II показывает, что размер частиц, создающих телескопические метеоры, таков, что он приближается к размерам наиболее крупных частиц зодиакального света¹.

Таблица II

Видимая яркость метеора	Масса, г	Радиус, см	Число метеоров, выпадающих на поверхность Земли в сутки	Общая масса, кг
-3	4	0,68	$2,8 \cdot 10^4$	110
-2	1,6	0,50	$7,1 \cdot 10^4$	110
-1	0,63	0,37	$1,8 \cdot 10^5$	110
0	0,25	0,25	$4,5 \cdot 10^5$	110
+1	0,10	0,19	$1,1 \cdot 10^6$	110
+2	0,04	0,14	$2,8 \cdot 10^6$	110
+3	0,005	0,06	$7,1 \cdot 10^6$	110
+4	0,002	0,04	$1,8 \cdot 10^6$	110
...
+8	0,00025	0,015	$4,1 \cdot 10^8$	110

в) Оценка полного потока метеорных частиц и массы метеорного вещества, выпадающего на Землю

Неоднократно делались попытки определить полный поток метеорных частиц на основании данных, полученных из наблюдений метеоров, и таким образом оценить массу метеорного вещества, выпадающего на единицу площади земной поверхности (или на всю поверхность Земли) в единицу времени (обычно за сутки). Это, очевидно, можно сделать в том случае, если окажется возможным перейти от наблюдаемого распределения метеорных тел к истинному их распределению за пределами земной атмосферы (с учетом микрометеоритов).

В 1955 г. С. В. Орлов пересмотрел ранее сделанные попытки оценить массу метеорного вещества, выпадающего на поверхность Земли. Он основывался на данных визуальных наблюдений метеоров, охватывающих диапазон яркостей от $+3^m$ до -3^m , поскольку визуальные оценки метеоров ярче -3^m уже неуверенны (-4^m — яркость Венеры в периоды наибольшей яркости), а метеоры слабее $+3^m$ не все будут регистрироваться, так как фон неба, зоркость наблюдателя и его опыт будут сильно сказываться на результатах наблюдений.

В 4 столбце табл. II приведены данные о численности метеоров, использованные С. В. Орловым. Пользуясь этими данными, он нашел значения суммарной массы метеорных тел, приходящейся на единичный интервал звездных величин. Для всех интервалов от -3^m до $+3^m$ (т. е. для частиц с размером от 0,68 см до 0,14 см) была получена масса около 100 кг (110 кг). На этом основании С. В. Орлов предполагает (и это предположение совершенно произвольно), что суммарная масса частиц любых размеров, в том числе и самых мелких, постоянна внутри единичного интервала звездных величин и равна ≈ 110 кг. Для такого предположения нет достаточных физических оснований. Можно было бы, например, думать, что при любых процессах образования твердых частиц должно было бы иметь место некоторое нормальное распределение по массам (и размерам):

$$n(m) = f(m) dm \quad \text{или} \quad n(a) = F(a) da.$$

В этом случае число метеорных частиц с некоторой определенной массой (с некоторым определенным размером) было бы максимальным.

С. В. Орлов считает, что приведенный в столбце 4 таблицы II ряд есть геометрическая прогрессия со знаменателем 2,5, и путем экстраполяции находит численность метеороидов в различных интервалах звездных величин (таблица III).

Таблица III

Видимая яркость метеора	Масса, г	Радиус, см	Число метеороидов, выпадающих на поверхность Земли в сутки	Число метеороидов, выпадающих за сутки на 1 м ²	Общая масса, кг
+18	$1,6 \cdot 10^{-8}$	10^{-3}	$7,1 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	110
+19	$6,3 \cdot 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{13}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	110
+20	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{13}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$	110
+21	10^{-9}	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	110
+22	$4 \cdot 10^{-10}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{14}$	$5,6 \cdot 10^{-1}$	110
+23	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{14}$	1,4	110
+24	$6,3 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{15}$	3,6	110
+25	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{15}$	9,0	110
+26	10^{-11}	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	22	110
+27	$4 \cdot 10^{-12}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{16}$	56	110
+28	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{16}$	142	110
+29	$6,3 \cdot 10^{-13}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{17}$	360	110
+30	—	—	$4,5 \cdot 10^{17}$	900	110

Если, далее, полагать, что частицы с радиусом $a < 0,25 \cdot 10^{-4}$ см не будут присутствовать в пылевом облаке вследствие того, что они подвержены действию давления излучения (эффект Пойнтинга—Робертсона), то вышеуказанное предположение дает возможность легко подсчитать M — полную массу вещества, выпадающего на Землю за сутки. С. В. Орлов берет диапазон от -40^m до $+30^m$ и считает, что на каждый интервал в одну звездную величину приходится ~ 100 кг метеорного вещества; при этом общая масса получается равной ≈ 10 т/сутки. Таким образом, на 1 м² в сутки выпадает поток метеороидов, равный 10^3 частиц ($a \approx 10^{-4}$ см).

Подсчет этот, конечно, крайне неуверенный, по существу совпадает с известной оценкой Ватсона.

Оценка Ватсона, так же как и оценка С. В. Орлова, основана на данных по наблюдению численности метеороидов, ежедневно попадающих в земную атмосферу. Ватсон принимает, что для метеороидов со скоростью $v = 56$ км/сек интервал звездных величин равен 40 (от -10 до $+30$), а ежесуточная масса выпадающего на Землю метеорного вещества составляет 4,4 т/сутки.

Недостатки такого рода расчетов рассмотрены в работе Б. Ю. Левина³.

Сравним результаты, полученные на основе метеорных наблюдений, с результатами наблюдений фраунгоферовой составляющей солнечной короны. Если N — число метеорных тел в одном кубическом сантиметре, ΔN — число метеорных тел, имеющих массы, размеры и звездные величины в заданном интервале, и a — радиус метеорных тел, тогда по Ватсону (на основании метеорных наблюдений)

$$\frac{dN}{da} = 10^{-28,2} a^{-5,2}, \quad (3)$$

а по Ван де Холсту (из наблюдений F-составляющей солнечной короны)

$$\frac{dN}{da} = 10^{-19,5} a^{-2,6}. \quad (4)$$

В таблице IV дано сравнение результатов, полученных двумя указанными выше методами, для числа частиц нескольких размеров в 1 куб. парсеке.

Таблица IV

$a, \text{ см}$	m_z	$\lg \frac{dN}{da}$		$\Delta (3)-(4)$
		по Ван де Холсту	по Ватсону	
0,10	1,5	-16,9	-23,0	6,1
0,03	5,2	-15,6	-20,4	4,8
0,01	9,0	-14,3	-17,8	3,5

Различие, как мы видим из таблицы IV, очень велико. Число частиц с размерами от 1 до 0,1 мм по Ван де Холсту примерно в 10 000 раз больше, чем можно судить по числу телескопических метеоров.

Ван де Холст дал объяснение¹ этого противоречия, исходя из определенного предположения о характере движения метеорных тел в межпланетном пространстве, причем в этом случае результаты обоих авторов могут считаться правильными. Некоторые исследователи, однако, высказывают сомнение в надежности как тех, так и других данных³.

В заключение приведем оценки прироста массы Земли за счет метеорного вещества, выпадающего на данную поверхность. Эти оценки также весьма противоречивы.

Оценка, исходящая из изучения численности метеоров, основана на применении элементарной формулы

$$\frac{dM}{dt} = 86\,400 \pi R^2 \bar{\sigma} v_g \rho, \quad (5)$$

где σ — эффективный поперечник столкновения метеора с Землей (см^2), v_g — геоцентрическая скорость метеора, ρ — плотность метеорного вещества. Использование формулы (5) приводит к значениям

$$4 < M < 15 \text{ т/сутки}$$

(4, 4 т/сутки по Ватсону⁴, 15 т/сутки по Левину³ в предположении, что $\rho = 10^{-23} \text{ г/см}^3$). Если $\rho = 10^{-21} \text{ г/см}^3$, как это следует из результатов Ван де Холста, то $\Delta M \approx 100 - 500 \text{ т}$ метеорного вещества в сутки.

Оценки количества выпадающей на Землю космической пыли, по данным различных исследователей, колеблются в пределах от 1500⁵ до 4000—6000 т/сутки^{6,7}. Эти оценки, основанные на результатах сбора космической пыли и исследованиях образцов ила, поднятого со дна океана вдали от берегов, обладают большой неопределенностью, и ошибка здесь может превосходить порядок.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ИЛИ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ) МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ

В настоящее время считается установленным, что метеоры с гиперболическими орбитами в планетной системе практически отсутствуют. Поэтому относительные скорости метеорных частиц за пределами земной атмосферы по отношению к спутнику или ракете будут заключены в пределах $70 \geq v \geq 11 \text{ км/сек}$. Таким образом, можно утверждать,

что на очень больших высотах метеорные частицы различных масс (и, следовательно, размеров) могут при ударе о ракету или спутник

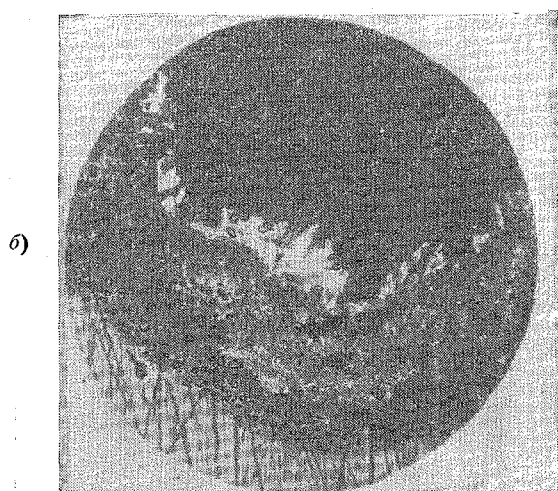
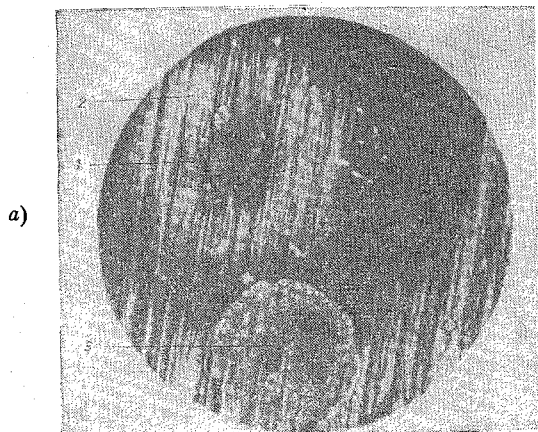


Рис. 1. Следы от соударения микрометеоров с полированной пластинкой из бронзы. а) 1 — кратер с поперечником 0,8 мм, 2 — цвета побежалости, 3 — коррозионное пятно; б) кратер с поперечником 3 мм.

передавать кинетические энергии или количества движения, указанные в таблице V.

Таблица V

Размер частиц, см	$E_{кин. эрг.}$	mv
10^{-4}	$8,3-3,6 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{-5}-10^{-5}$
10^{-3}	$8,3 \cdot 10^3-3,6 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^{-2}-10^{-2}$
10^{-2}	$8,3 \cdot 10^6-3,6 \cdot 10^8$	15-99
10^{-1}	$8,3 \cdot 10^9-3,6 \cdot 10^{11}$	$150 \cdot 10^2-990 \cdot 10^2$

Из таблицы V видно, что кинетическая энергия для частиц интересующих нас размеров заключена в пределах

$$10 < E_{\text{кин}} 10^{11} \text{ эрг.}$$

Эти величины вполне доступны измерениям, если не будет никаких помех в виде других ударяющих частиц (не космической пыли) или каких-либо других мешающих факторов.

а) Некоторые из возможных методов исследования микрометеоритов с помощью ракет

Микрометеориты были обнаружены при подъеме ракет по следам от соударений частиц с полированными пластинками, путем регистрации акустической энергии, возникающей при столкновениях, а также при помощи фотоумножителей, регистрирующих световой импульс, появляющийся при ударе частиц о приемник.

Следы от соударения микрометеоров с полированной пластинкой из бронзы на высоте примерно 100 км изображены на рис. 1. Следы представляют собой небольшие кратеры глубиной в несколько микрон с поперечником, в отдельных случаях достигающим двух и более миллиметров. По краям кратера наблюдаются цвета побежалости. Как видно из рисунков, мелкие частицы могут серьезно повреждать оптические поверхности и нарушать нормальную работу оптической и другой аппаратуры при полетах искусственного спутника Земли, пребывающего в верхней атмосфере длительное время.

В декабре 1949 г. и августе 1950 г. под руководством профессора Бона были выполнены первые акустические измерения⁸. Во время полетов ракеты V-2 были зарегистрированы импульсы, обусловленные, по-видимому, ударами микрометеоритов. Число микрометеоритов, соударяющихся с корпусом ракеты, исследовалось при помощи кристаллического микрофона и усилителя в области 30—60 кгц с полосой пропускания 10 кгц.

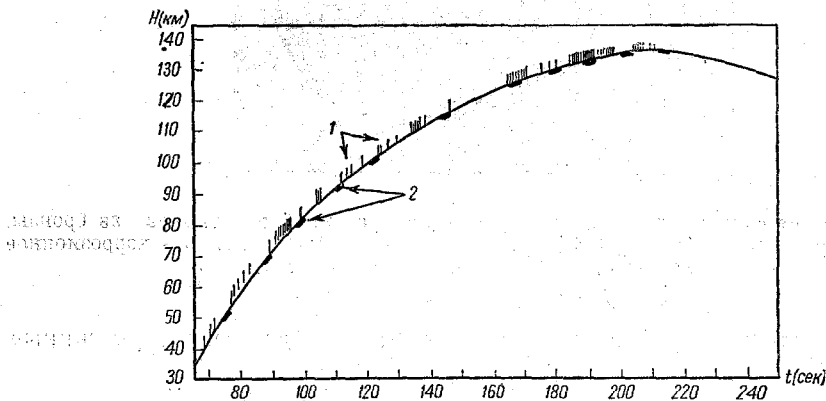


Рис. 2. Вероятные метеорные соударения, зарегистрированные во время пуска ракеты V-2 8 декабря 1949 г. 1 — метеорные соударения; 2 — калибровочное напряжение (телеметрия не работает).

8 декабря 1949 г. между 70-й и 214-й секундами полета ракеты было зарегистрировано 66 столкновений, что составляло 1 удар в 2,2 секунды (рис. 2). Это по порядку величины совпадает с расчетом Уиппла⁷, согласно которому вероятное число столкновений с частицами,

обладающими энергией выше 10^{-2} эрг (которые могли быть обнаружены микрофоном), равно 10 столкновениям в 1 сек. на 1 кв. м. Расчет Уиппла основан на приведенных выше результатах Ватсона, которые, как было показано, нельзя считать надежно установленными.

Во время подъема 31 августа 1950 г. на высотах от 90 до 150 км было зарегистрировано всего 14 соударений. Эта разница объясняется разной чувствительностью приемно-усилительного устройства.

Для обнаружения соударений с микрометеоритами на ракете «Аэробии» в эксперименте 14 сентября 1955 г. был установлен кристаллический микрофон из дигидрофосфата аммония с диафрагмой из нержавеющей стали толщиной 0,017 дюйма и площадью 25 кв. дюймов. Микрофон и усилитель имели собственную частоту в области 70 кГц с полосой пропускания в 10 кГц и имели выход на телеметрию. Калибровка чувствительности аппаратуры выполнялась следующим образом: песок, рассортированный по диаметру в пределах от 4000 микрон до менее чем 100 микрон, сбрасывался на диафрагму, при этом регистрировались показания системы. Чувствительность всей системы была такова, что частицы диаметром около 200 микрон, падающие с высоты 2 см, давали на выходе усилителя сигнал около 2 в. Для ракеты, движущейся со скоростью, равной 1 М, эквивалентная чувствительность будет в случае соударения с частицей поперечником в 2 микрона и звездной величиной +15. При относительных скоростях удара порядка 20 км/сек двухвольтовое отклонение на выходе усилителя дадут частицы +20 — +25 звездной величины.

Были проведены также опыты по выявлению реакции акустической системы на соударения с микрометеорами всего корпуса ракеты. Для заданных импульсов сигнал спадал по экспоненте с расстоянием от микрофона, однако все удары по поверхности ракеты могли быть зарегистрированы.

Описанные выше опыты дают данные о потоке метеорных частиц на единицу поверхности. Для определения энергии и импульса частиц необходимо изолировать приемную поверхность от всего тела ракеты. Тогда, имея тарировочные кривые $V = P \left(mv, \frac{mv^2}{2} \right)$, можно по реакции системы на удар определить значение P .

В настоящее время нельзя с определенностью сказать, чем определяются показания пьезодатчика при ударе о него частиц, летящих с космическими скоростями, — импульсом или кинетической энергией, или некоторой функцией того и другого. Пьезодатчик должен был бы регистрировать количество движения. Однако опыт по исследованию его реакции на соударения длительностью в микросекунды показывает, как видно из графика, изображенного на рис. 3, что пьезоэлемент реагирует не только на количество движения, но также и на кинетическую энергию.

Для разделения массы и скорости необходимо на ракете или спутнике иметь дискриминатор частот, а тарировку проводить отдельно на массу и на скорость, но уже не путем сбрасывания на диафрагму песка, а путем ускорения частиц в электрическом поле.

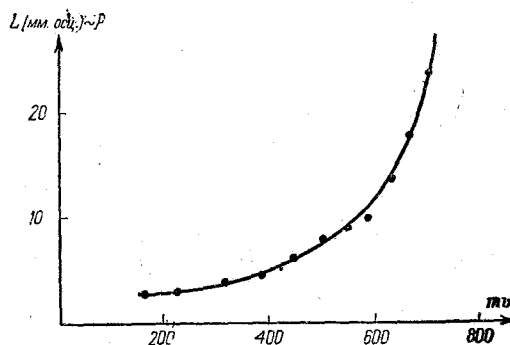


Рис. 3. Реакция пьезодатчика на удар длительностью в 1 микросекунду.

Кристаллический микрофон с усилителем и телеметрической системой позволяет зарегистрировать удары метеорных частиц с энергиями от 1 до 10^6 эрг.

В 1955 г. был разработан для исследования микрометеоров новый прибор⁹. Этот прибор представляет собой плексигласовый конус, покрытый слоем алюминия толщиной $8 \cdot 10^{-6}$ см и соединенный с фотоумножителем. На рис. 4 показано поперечное сечение приемника и его расположение относительно ракеты. При соударении микрометеоров с приемником возникает свечение, которое регистрируется фотоумножителем с последующей передачей сигнала по телеметрии на Землю. Аппаратура обладает большой чувствительностью. Она дает возможность зарегистрировать световой импульс в $0,0001$ лм·сек/м.

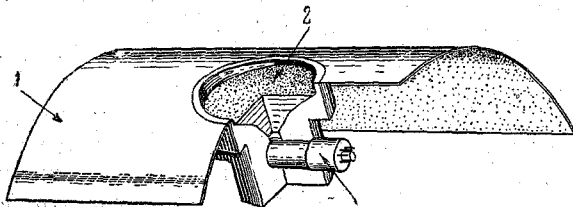


Рис. 4. Алюминированный конус из плексигласа 2 с прозрачным выходным окном, примыкающим к фотоумножителю 3. 1 — обшивка ракеты.

Известно, что при соударении микрометеоритов с преградой кинетическая энергия расходуется на нагревание, видимое свечение и частично ионизацию. Если предположить, что выделяющаяся при этом энергия распределится так же, как у метеоритов, движущихся в разреженной атмосфере, то тогда соотношение (теоретически) между соответствующими долями энергии будет следующее: 10^4 (тепло) : 10^2 (свет) : 10^0 (ионизация). Учитывая это, было найдено, что данный приемник может регистрировать соударения с микрометеоритами, обладающими энергией всего $0,005$ эрг, что соответствует, например, энергии железного метеорита с диаметром в один микрон и скоростью примерно $0,5$ км/сек.

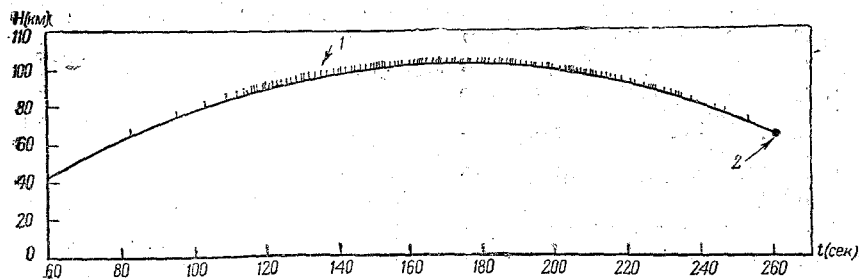


Рис. 5. Метеорные соударения, зарегистрированные во время полета «Аэробы» 17 ноября 1955 г. 1 — метеорные соударения, 2 — конец работы телеметрии.

На рис. 5 приведены данные исследований микрометеоритов во время пуска ракеты «Аэробы» в 1955 г. Высота подъема 103 км. На графике зарегистрированные соударения наложены на траекторию ракеты. Приемник площадью в 75 см² зарегистрировал 114 соударений с микрометеоритами, из них 101 произошло в течение 84 сек., когда ракета находилась выше 85 км — высота, над которой не было обнаружено видимого увеличения частоты соударений. Таким образом, на 1 см² площади приходится 1 удар в 57 сек.

Анализируя полученные данные, следует указать, что отметки о соударениях приемника с микрометеоритами зарегистрированы (как при подъеме, так и при спуске) только выше некоторой определенной высоты, причем они расположены симметрично относительно максимальной вы-

соты подъема ракеты. В отметках ударов отсутствует цикличность, несмотря на шестисекундный период вращения ракеты в полете. Последнее свидетельствует об отсутствии какого-либо радианта, из которого приходят метеориты. В то время, когда ось вращения ракеты была параллельна Земле, приемник регистрировал соударения с микрометеорами, лишь будучи обращен вверх.

В данном эксперименте регистрировался только поток частиц. Однако описанным способом можно получить данные и о спектре энергий и импульсов при условии предварительной калибровки, устанавливающей соответствие между кинетической энергией или количеством движения движущихся частиц и вызываемым ими световым импульсом.

Для исследования твердой составляющей межпланетного вещества с помощью ракет и искусственных спутников Земли могут быть также применены и некоторые другие методы.

Таблица VI

Частицы	$E_{кин}, эрг$
Электрон . .	$9 \cdot 10^{-12}$
Протон . . .	$1,7 \cdot 10^{-8}$
α -частица . .	$6,7 \cdot 10^{-8}$
Атом Ca^+ . .	$3,6 \cdot 10^{-10}$

б) Мешающие факторы

При постановке исследований микрометеоритов на ракетах имеет смысл обсудить возможные помехи и другие факторы, могущие сказаться на результатах применения описанной выше методики.

Кроме метеорных частиц, о корпус ракеты или искусственного спутника Земли при их полете в верхней атмосфере могут ударяться корпускулы, выбрасываемые Солнцем, и космические частицы, входящие в состав первичных космических лучей. Известно, что солнечные корпускулы (за исключением некоторой их части, испускаемой лишь во время хромосферных вспышек) имеют скорости $\sim 1,5 \cdot 10^8$ км/сек. Предпола-

Таблица VII

Частицы	$E_{кин}, эв$	$E_{кин}, эрг$
α -частицы	10^7	$1,6 \cdot 10^{-5}$
	10^9	$1,6 \cdot 10^{-3}$
	10^{12}	1,6
	10^{17}	$1,6 \cdot 10^5$

гая, что этими частицами являются электроны, протоны, альфа-частицы и ионы Ca, получим значения энергии, приведенные в таблице VI.

Для ядер гелия, входящих в состав космического излучения, соответственно получатся значения, указанные в таблице VII.

Из приведенных выше таблиц VI и VII видно, что солнечные корпускулы обладают энергиями, на много порядков меньшими тех, которые могут быть зарегистрированы приемной аппаратурой. Что же касается космических α -частиц, то их энергия достаточна для того, чтобы быть зафиксированной, однако применяемые микрофоны прозрачны для космических частиц.

в) Электрические и магнитные эффекты

В первоначальной постановке задачи мы считали метеорное вещество электрически нейтральным. Рассмотрим теперь, что должно измениться в постановке нашей задачи в экспериментальном и теоретическом отношениях, если предположить, что космическая пыль имеет некоторый электрический заряд.

Если ставится задача об изучении метеорной активности не только в данном месте земной поверхности, но изучается широтный эффект и имеется в виду решить астрономическую проблему о распределении метеорного вещества вблизи земной орбиты или в солнечной системе, то в случае, если пыль заряжена, задача, с одной стороны, усложняется, но, с другой стороны, возникает ряд новых возможностей. Действительно, если пылевые частицы имеют положительный заряд, то на них, помимо сил гравитации и давления излучения, будут действовать магнитные поля солнечной системы и Земли. Кроме того, как это поясняется ниже, на движение будет влиять изменение во времени заряда частицы, если таковое будет происходить.

Рассмотрим кратко, чем должен определяться заряд пылевой частицы и какие геофизические последствия должны вызываться его наличием.

В основном величина заряда должна определяться влиянием двух эффектов, действующих в противоположных направлениях: электризацией и нейтрализацией. Электризация вызывается фотоэлектрической эмиссией (вследствие прямого фотоэффекта) и ударами протонов, также высвобождающих электроны. Нейтрализация происходит путем поглощения электронов из окружающего пространства под воздействием кулонова поля частицы. Заряд пылевой частицы поэтому должен меняться в зависимости от времени: он должен быть различен для частиц, находящихся в данный момент времени в дневной и ночной частях атмосферы; на его величине должно отражаться состояние солнечной оболочки (например, заряд должен резко возрастать во время хромосферных вспышек).

Определив заряд, мы можем оценить порядок отношения $\frac{Q}{mv}$, где Q — заряд частицы, m — ее масса, а v — скорость. Эта величина $\frac{Q}{mv}$ называемая магнитной жесткостью, играет главную роль в оценке различных геофизических эффектов, в частности широтных изменений метеорной активности и ее изменений, обусловленных магнитными бурями. Характер движения заряженной частицы может вместе с тем служить индикатором магнитного поля Земли.

В условиях экспериментов на ракетах и искусственных спутниках Земли то обстоятельство, что метеорные частицы заряжены, может влиять отрицательным образом вследствие явления индукции. Поэтому для экранировки приемников следует применять металлические диафрагмы. Если в качестве таких диафрагм ставить полированные металлические пластинки, то одновременно с регистрацией ультразвуковых колебаний, возникающих при ударе микрометеоров, можно регистрировать метеорные удары как следы на полированных пластинках.

Все особенности, связанные с ударом быстрой заряженной частицы о мембрану, очень трудно заранее учесть. Поэтому возникает вопрос о необходимости лабораторного моделирования. Предварительный (прикидочный) расчет показывает, что заряженные пылинки интересующих нас размеров можно ускорить до необходимых скоростей в полях $\sim 100-200$ кэВ.

Постановку подобного эксперимента следует признать весьма желательной, так как необходимо выяснить различие в результатах медленных и быстрых ударов частиц о преграду. Вероятно, лишь в этом случае удастся, например, до конца выяснить для быстрых частиц относительную роль кинетической энергии и импульса в результирующем пьезоэффекте.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. C. van de Hulst, *Ap. J.* **105**, 471 (1947).
 2. P. J. van Rhijn, *Pub. Astr. Lab. Groningen* **31** (1921).
 3. Б. Ю. Левин, *Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе*, Изд. АН СССР, 1956.
 4. F. Watson, *Between the planets*, Philadelphia, 1940 (русский перевод: Гостехиздат, М., 1947).
 5. C. de Jager, *Colloque a Liege* **174** (1954).
 6. H. Petterson and H. Potschi, *Nature* **166**, 308 (1950).
 7. H. Petterson and H. Potschi, *Geochim. et Cosmochim. Acta* **2**, 84 (1952).
 8. M. Dubin, *Meteor impacts by Acoustical Techniques Rocket exploration of the atmosphere*, 1954.
 9. O. E. Berg, L. H. Meredith, *Meteorite impacts to altitude of 103 kilometers*, *J. of Geoph. Res.* **61**, № 4 (1956).
-