

УДК 523.4

В. Г. Кручиненко

Астрономическая обсерватория
Киевского Национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев, ул. Обсерваторная, 3

Приток космических тел на Землю в широком интервале масс

На основании анализа наблюдательных и экспериментальных данных по исследованию притока космических тел на Землю в нескольких узких интервалах масс получена усредненная интегральная функция притока тел (частиц) в широком интервале масс: от 10^{-12} до 10^{22} г. Эта зависимость сравнена с подобной другой, полученной на основании иных данных в интервале масс от 10^{-18} до 10^{18} г. Расхождение этих функций, а также несколько различные выводы можно объяснить, по мнению автора, низкой точностью данных. В отдельных исследованиях различие потоков частиц для одних и тех же масс достигает нескольких порядков.

ДОПЛИВ КОСМІЧНИХ ТІЛ НА ЗЕМЛЮ В ШИРОКОМУ ІНТЕРВАЛІ МАС, Кручиненко В. Г. — На підставі аналізу спостережних та експериментальних даних з дослідження допливу космічних тіл на Землю в кількох вузьких інтервалах мас отримана інтегральна функція допливу тіл (частинок) у широкому спектрі мас: від 10^{-12} до 10^{22} г. Ця залежність порівнюється з іншою, їй подібною, але отриманою за іншими даними в інтервалі мас від 10^{-18} до 10^{18} г. Деяка розбіжність цих функцій та висновків, які звідси випливають, можна пояснити, на думку автора, низькою точністю даних. В окремих роботах різниця потоків частинок для одних і тих же мас сягає кількох порядків.

INFLUX OF SPACE BODIES WITH MASSES IN A WIDE RANGE ON THE EARTH, by Kruchynenko V. G. — Based on the analysis of observations and experimental data on the influx of space bodies on the Earth in a small interval of masses, an average integral function of bodies (particles) is obtained for a wide interval of masses from 10^{-12} to 10^{22} g. This dependence is compared with the similar one obtained on the basis of other data where the masses range from 10^{-18} to 10^{18} g. It is the author's opinion that this discordance of the functions and somewhat different conclusions can be attributed to more accurate recent data. This is confirmed by some studies where the differences of particle fluxes for the same masses reach several orders of magnitude.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросу притока твердой составляющей космического вещества на Землю посвящены многочисленные работы. Они основаны на различных методах регистраций и исследований, так как относятся к широкому спектру размеров (масс) тел — от мельчайших космических пылинок, размер которых составляет порядка десятка нанометров (массы порядка 10^{-18} г) [29] до крупных астероидных и кометных тел с массами 10^{20} — 10^{22} г.

Чтобы получить некоторое среднее интегральное распределение притока частиц (тел) на Землю (с массой не меньше данной) в широком интервале масс необходимо провести анализ притока тел, полученного различными методами, в отдельных небольших интервалах масс. По этим данным можно составить общую интегральную (кумулятивную) функцию аккреции тел Землей. Впервые, по-видимому, такая зависимость в графическом виде была получена Уипплом [53]. Вопросы притока также рассматривали многие другие исследователи, в частности: В. А. Бронштэн [4, 5], А. Н. Симоненко и Б. Ю. Левин [17], З. Цеplexa с сотрудниками [23, 24], Грюн с сотрудниками [29] и др. Для построения интегрального распределения притока тел на Землю и представления его в виде аналитической или корреляционной зависимости мы воспользуемся некоторыми результатами из указанных выше работ, а также данными [45, 51], которые получены в последнее время. Часть результатов, приведенных здесь, была представлена на международной конференции «METEORIDS 1998» [37].

Дифференциальный закон распределения частиц (тел) по массе в Солнечной системе в широком интервале масс можно приближенно представить степенной зависимостью: $f(M) \propto M^{-s}$. Параметр распределения s для небольших интервалов масс, как для частиц метеорных потоков, так и для мелких и крупных тел спорадического фона, изменяется, как правило, от 1.5 до 2.5. Если $s = 2.0$, то суммарная масса тел (частиц) в равных логарифмических интервалах масс одна и та же. На этом основании интегральную зависимость для притока космических тел на Землю в каждом рассматриваемом интервале масс представляем в следующем виде:

$$\lg N = -A - B \lg M, \quad (1)$$

где $B = s - 1$; N — число частиц с массами, которые не меньше M (в граммах) и которые на расстоянии Земли от Солнца (1 а. е.) пересекают в направлении на Солнце из телесного угла 2π стерadian площадку один квадратный сантиметр за секунду. Очевидно, что дифференциальное распределение потока частиц будет зависеть и от угла между плоскостью эклиптики и направлением потока и будет уменьшаться с его увеличением. Степенная зависимость (1) распределения метеорных тел по массе первоначально возникла из показательной функции светимости метеоров, которая была определена из визуальных наблюдений:

$$A(m) = A(0)k^m.$$

Здесь m — абсолютная звездная величина метеора, приведенная к расстоянию 100 км, $A(m)dm$ — поток метеоров, k — основание функции светимости. Отсюда нетрудно получить закон Парето (1), если принять, что $s = 1 + 2.5 \lg k$, где x — показатель степени массы метеороида в формуле для интенсивности I излучения метеора как функции массы, скорости и зенитного угла входа в атмосферу.

Зависимость (1) соответствует случаю, когда скорость и зенитное расстояние метеоров постоянны, т. е. $I \propto M^x$. Согласно различным данным $x \approx 1.0$. Поэтому с увеличением звездной величины на единицу при

значении параметра $s = 2.0$ поток метеоров увеличивается в 2.5 раза.

Не исключено, что в максимально широком интервале масс функция распределения частиц и тел по массе (размеру) в Солнечной системе близка к нормально-логарифмической. Тем более, что для частиц, мельче микронных размеров, световое давление и дробление будут играть определяющую роль в распределении частиц по массе. В работе [34], например, принимается, что увеличение числа микрометеороидов с уменьшением массы должно прекратиться при $M = 10^{-14}$ г, т. е. при этой массе возможен максимум распределения. В работе [55] на основании экспериментальных данных предлагается зависимость потока частиц от логарифма массы, которая близка к функции Гаусса с максимумом при $\lg M = -9$. Авторы считают, что аппроксимация надежная для частиц с массами $M > 10^{-10}$ г. Для частиц меньших масс левая ветвь кривой получена путем экстраполяции аналитического выражения.

Здесь уместно напомнить о классической работе А. Н. Колмогорова [9], в которой теоретически получен нормально-логарифмический закон распределения частиц по размеру для случайного, продолжающегося неограниченное время, процесса последовательного дробления. Стимулировали эту работу статьи Н. К. Разумовского [14, 15], в которых на основании данных экспериментов приведены те случаи, когда распределение логарифмов размеров частиц или логарифмов их масс подчиняется приближенно закону Гаусса. К этим примерам относятся распределения золотин в золотоносных россыпях, частиц пород при их дроблении, частиц, взвешенных в воде и в воздухе, ценных компонентов в породе и др.

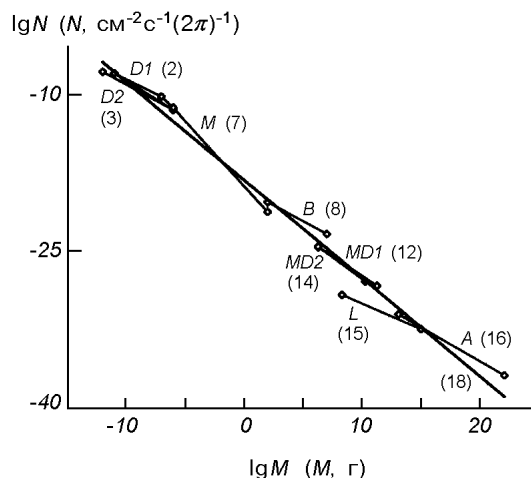
В то же время в работах [27, 28] на основании изучения столкновительной эволюции тел показано, что если их распределение описывается обратностепенным законом, то оно не будет стабильным при отсутствии источников пополнения, если $s > 1.83$. Если параметр дифференциального распределения по массе $s = 1.83$ (степень в распределении по размерам равна 3.49), то число частиц, образованных в единицу времени в единичном интервале масс столкновительной фрагментацией больших тел, равно числу частиц в этом интервале масс, которые через те же разрушительные столкновения исчезают за единицу времени. Здесь речь идет о таком мощном резервуаре тел, как астероидный пояс. В нем может сохраняться стабильным распределение по массе при $s = 1.83$ без дополнительных источников вещества. Функция распределения тел по массе играет важную роль при исследовании процесса аккумуляции допланетных тел методами коагуляции. В работах [7, 16], где рассматривается этот вопрос, сделан вывод, что обратностепенной закон является асимптотическим решением уравнения коагуляции и не зависит от начального распределения масс. Было также показано, что при коэффициенте коагуляции, учитывающем гравитационное взаимодействие тел, асимптотическое решение можно приближенно описать обратностепенным законом с показателем $s \approx 1.7$ почти на всем интервале изменений масс, за исключением области наиболее крупных тел.

РАЗЛИЧНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ МАСС

1. Для самых мелких пылевых частиц (массы от 10^{-12} до 10^{-6} г) интегральное распределение по массе получено в результате обобщения данных измерений с помощью космических аппаратов и высотных ракет [13] и может быть представлено следующей зависимостью

$$\lg N = -15.1 - 0.6 \lg M. \quad (2)$$

Рис. 1. Интегральный поток космических тел на Землю с массами, которые не меньше M , в отдельных интервалах масс и общая средняя зависимость



На рис. 1 зависимость (2) представлена кривой $D1$. Результаты анализа притока мелких частиц в интервале масс от 10^{-11} до 10^{-7} г приведены также в монографии [11]. Полученные данные можно представить формулой

$$\lg N = -14.1 - 0.55 \lg M. \quad (3)$$

На рис. 1 зависимость (3) показана линией $D2$. Видим, что формулы (2) и (3) практически не отличаются одна от другой. Поток пылевых частиц в интервале масс от 10^{-13} до 10^{-6} г, который получен в работе [35] по прямым измерениям на ИСЗ, практически совпадает с результатом, который представлен формулой (3)

$$\lg N = -14.03 - 0.55 \lg M. \quad (4)$$

В работе [26] на основании анализа данных каталога 2520 фотографических метеоров [41], полученных камерами Супер-Шмидт, сделан вывод, что для этих метеороидов параметр распределения по массе $s = 1.88 \pm 0.14$. Нами для этого же каталога получено, что дифференциальное распределение метеороидов по массе можно представить нормально-логарифмической функцией:

$$\lg F = \exp[-1.39(\lg M - \lg M_m)^2], \quad (5)$$

где $M_m = 0.018$ г — среднее значение массы. Подавляющее большинство этих метеороидов имеют массы в интервале $4.5 \cdot 10^{-3} - 7.1 \cdot 10^{-2}$; поэтому $M_m = (4.5 \cdot 10^{-3} \cdot 7.1 \cdot 10^{-2})^{1/2} = 0.018$ г. При этом дисперсия распределения (5), очевидно, равна $\sigma^2 = 0.36$. Результат (5) не отражает реального распределения метеороидов — он обусловлен селективностью наблюдательного материала. Такой же вывод можно также сделать, если для этих метеороидов построить интегральное распределение по массе и линейно аппроксимировать участки параболы в сравнительно небольших интервалах масс. Для интервала наиболее мелких частиц ($\lg M = -3.25 \dots -2.75$) параметр $s = 2.08$, для несколько больших масс ($\lg M = -2.75 \dots -2.25$) значение параметра $s = 1.60$. Дальше с увеличением массы этот параметр продолжает уменьшаться: 1.46; 1.24; и 1.12 для последующих участков логарифмов масс, каждый из которых равен 0.50. Какое здесь выбрать значение параметра s ? Если среднее, то оно равно 1.5. Если же принять, что наиболее точным значением параметра s (или менее всего искаженного селекцией) будет среднее его значение для двух первых интервалов, то $s = (2.08 + 1.60)/2 = 1.84$, что приблизительно и получено в работе [26]. Точно такой же функцией (5) (с тем же значением дисперсии) можно представить и распределение «наблю-

даемых» (точнее — фотометрических) масс примерно 170 метеороидов, полученных из фотографических наблюдений ярких метеоров в Киеве [1—3] так называемыми малыми камерами. Отличие от распределения (5) — среднее значение массы: $M_m = 0.56$ г, так как большая часть метеороидов имеют массы от 0.14 г до 2.24 г.

Близкое к предыдущему значение параметра $s = 2.05$ было получено в работе [46] при определении потока метеорных тел двумя методами: по радиолокационным наблюдениям с четырьмя различными уровнями порогового сигнала приемника (Гавана, США) и по измерениям на Орбитальной геофизической обсерватории (OGO-2). По данным радионаблюдений получена следующая интегральная плотность потока (в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) в зависимости от массы (г):

$$\lg N = -16.0 - 1.05 \lg M. \quad (6)$$

Результаты, полученные на OGO-2, показали, что для частиц с массами свыше 10^{-12} г максимальная плотность потока равна $3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} (2\pi \text{ ср})^{-1}$, т. е. подтверждают данные, которые следуют из формулы (6), хотя эта величина для указанных масс значительно превышает потоки метеороидов, полученных наземными и космическими средствами и представленных формулами (2)—(4).

2. В монографии [11] также обобщены данные оптических и радиолокационных наблюдений. Для интервала масс от 10^{-6} до 10^2 г интегральную зависимость потока метеороидов можно представить в виде

$$\lg N = -18.8 - 1.25 \lg M. \quad (7)$$

На рис. 1 аппроксимация (7) обозначена буквой M . Формула (7) не отличается существенно от зависимости, которая следует из работы [53] для интервала масс от 10^{-5} до 10^2 г с использованием результатов работ [21, 31, 32]:

$$\lg N = -18.30 - 1.34 \lg M.$$

На основании радиометеорных измерений потока частиц с массами от 10^{-6} до 10^{-2} г в работе [35] получено распределение, которое не сильно отличается от (7):

$$\lg N = -18.66 - 1.03 \lg M.$$

3. Для тел, порождающих болиды, интегральное распределение падающего на Землю потока космических тел в интервале масс от 10^2 до 10^7 г представляем выражением

$$\lg N = -19.1 - 0.62 \lg M. \quad (8)$$

Зависимость (8) получена Мак-Кроски [40]. На рис. 1 это интервал B . На основании различных наблюдательных данных [19] подтверждено, что для больших метеороидов, имеющих массы $M \approx 10^6$ г, параметр $s = 1.6$. В работе [25] рассматриваются результаты регистрации сейсмометрами 394 соударений метеорных тел с массами не меньшими 5 кг с поверхностью Луны на местах посадки «Apollo 12» и «Apollo 14». Полученное кумулятивное распределение метеорных тел по массе можно представить в виде

$$\lg N = -17.5 - 1.5 \lg M. \quad (9)$$

Нетрудно показать, что согласно различным наблюдательным данным, приведенным как на рис. 1, так и на рис. 2, приток метеороидов с массами $M \geq 5 \cdot 10^3$ г почти на два порядка больше, чем следует из формулы (9). Мы считаем, что данные работы [25] по каким-то неизвестным нам причинам существенно занижены.

Из фотографических наблюдений болидов, проведенных сетью станций, в работе [30] получены данные о падениях метеоритов в интервале масс от 0.1 до 12 кг. На этом основании выведена интегральная зависимость для потока породивших их метеороидов. Если ее пересчитать в принятую нами систему единиц и приблизительно учесть потери массы при пролете через атмосферу, то для интервала масс $3.16 \cdot 10^3 \dots 1.36 \cdot 10^5$ г получим формулу

$$\lg N = -19.74 - 0.689 \lg M. \quad (10)$$

Сравнение соотношений (10) и (8) показывает, что параметры распределения по массе в обоих случаях различаются незначительно, тогда как поток метеороидов согласно [40], включающий рассматриваемый интервал масс, в семь раз выше потока, который представлен формулой (10). Это различие, вероятно, связано с ограниченным количеством уникального наблюдательного материала — всего 43 падений метеоритов.

4. Поток тел с массами $M \geq 10^6$ г. Недавно опубликована работа Ревелле [51], в которой проведен детальный анализ данных измерений гравитационно-акустических волн в атмосфере Земли, зарегистрированных микробарографами ВВС США с 1960 по 1980 гг. Зарегистрированные ударные и взрывные волны автор связал с полетом и разрушением в атмосфере крупных метеороидов. В итоге им получена интегральная зависимость для числа N тел, попадающих в атмосферу Земли, энергия которых не меньше E , в интервале энергий от 0.1 до 10^4 кт ТНТ (1 кт ТНТ = $4.2 \cdot 10^{12}$ Дж = $4.2 \cdot 10^{19}$ эрг):

$$\lg N = -11.01 - 0.731 \lg E, \quad (11)$$

где N в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, E в эрг. Для перехода от энергий к массам падающих тел мы провели анализ данных наблюдений болидов «Прерийной Сети» [42, 43] и получили, что средняя заатмосферная скорость метеороидов, начальные массы которых не меньше 1 кг, составляет 21.0 ± 7.4 км/с. Поэтому для расчетов приняли скорость 21 км/с в качестве средней скорости входа таких тел в атмосферу Земли. Указанному выше диапазону энергий соответствуют массы тел от $1.9 \cdot 10^6$ до $1.9 \cdot 10^{11}$ г, а интегральный падающий поток тел представляем в виде:

$$\lg N = -20.13 - 0.731 \lg M. \quad (12)$$

На рис. 1 формула (12) показана линией $MD1$.

Нами также использованы результаты регистраций световых вспышек в земной атмосфере от болидов фотодиодами корпорации «Sandia National Laboratories», которые были установлены на геостационарных спутниках США. В течение 1994—1996 гг. зарегистрировано 51 световое явление в диапазоне энергий от 0.1 до 10 кт [45, 52]. Принимая среднюю скорость входа тел 21 км/с, мы получили, что диапазон масс равен $1.9 \cdot 10^6 \dots 1.9 \cdot 10^{10}$ г. Интегральную зависимость числа падений метеороидов в год на всю Землю, как функцию от энергии E (в кт ТНТ), можно, согласно [45], представить в виде

$$N(E) = 10.0/E^{0.87}. \quad (13)$$

Отсюда нетрудно получить интегральную зависимость числа тел от массы в используемой нами системе единиц:

$$\lg N = -18.89 - 0.871 \lg M. \quad (14)$$

На рис. 1 соотношение (14) показано прямой $MD2$. Необходимо отметить, что зависимости $MD1$ и $MD2$, которые получены примерно для одного и того же интервала масс метеороидов, но из совершенно различных наблю-

дений, имеют достаточно хорошее согласие.

5. Для интервала масс от $2 \cdot 10^8$ до 10^{14} г используем зависимость, полученную «для всех лунных кратеров» в работе [53]:

$$\lg N = -23.3 - 0.6 \lg M. \quad (15)$$

На рис. 1 функция (15) обозначена буквой L .

6. Для астероидов семейства Аполлон, которые приближаются к орбите Земли, в работе [53] приведена оценка интегрального потока $N = 2.0 \cdot 10^{-33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для тел с массами $M > 2.8 \cdot 10^{15}$ г. По данным [23] основной вклад в области крупных тел вносят астероидные и кометные тела с массами от 10^{15} до 10^{18} г (согласно рис. 2 и 3 этой работы верхний предел масс может быть на несколько порядков выше указанного). По данным [50] дифференциальное распределение по массе астероидов, приближающихся к орбите Земли, имеет параметр $s = 1.66$, а по результатам работы [36] для всех астероидов $s = 1.65$. На основании приведенных выше результатов получаем интегральную функцию притока астероидных тел в следующем виде:

$$\lg N = -22.7 - 0.65 \lg M. \quad (16)$$

Допускаем, что зависимость (16) можно аппроксимировать поток тел в интервале масс от 10^{15} до 10^{22} г. На рис. 1 формула (16) представлена линией A . Наклоны кривых (15) и (16) почти не отличаются между собой — аппроксимация A для астероидов практически продолжает зависимость L для лунных кратеров.

В работе [38] на основании комбинации данных по метеорам, зарегистрированным в атмосфере Земли, и результатов сейсмических наблюдений на поверхности Луны, получен интегральный поток F метеороидов в зависимости от их диаметров d в интервале от 10^{-2} см до 10 м:

$$F = 5.6 \cdot 10^{-23} d^{-3.48}. \quad (17)$$

Поток приведен в единицах $\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, d в м. Если принять плотность тел 3 г/см^3 и записать поток в $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а массу в граммах, то интегральную зависимость (17) можно представить в виде

$$\lg N = -19.06 - 1.16 \lg M \quad (18)$$

для интервала масс от $1.6 \cdot 10^{-6}$ до $1.6 \cdot 10^9$ г. Полученный интервал масс довольно значительный (15 порядков) и охватывает метеорную (M), болидную (B) и большую часть $MD1$ (или $MD2$) области (см. рис. 1). Интегральный поток метеороидов, представленный зависимостью (18), только в метеорной (M) области близок к потоку, выраженному формулой (7), хотя и меньше его в 3.4 раза. В болидной области (B) он меньше потока (8) в 38 раз, а в $MD1$ области — меньше потока, который следует из зависимости (12), в 630 раз. На основании сравнительного анализа мы приходим к выводу, что аппроксимация (18), вероятно, — очень приближенная, особенно в области больших масс, поэтому на рис. 1 она не представлена.

Приведенные данные об аккреции космических тел Землей в различных интервалах масс нанесены на рис. 1, и методом наименьших квадратов выведена общая средняя интегральная зависимость в диапазоне масс от 10^{-12} до 10^{22} г:

$$\lg N = -18.17 - 0.936 \lg M \quad (R^2 = 0.9859). \quad (19)$$

Формула (19) дает некоторую среднюю характеристику темпа притока космических тел на Землю. Ее можно использовать для различного рода оценок. Если соотношение (19) переписать как интегральный приток числа

тел с массой не меньше M на всю Землю за год, то получим следующее выражение:

$$\lg N^* = 8.05 - 0.936 \lg M. \quad (20)$$

Согласно результатам «Прерийной Сети» [42, 43] примерно 30 % метеороидов из тех, что имеют начальные массы не меньше 1 кг, достигают высот $H \leq 30$ км. Один из них (Lost City) достиг земной поверхности. Из уравнений (19) или (20) и данных [42, 43], следуют такие заключения.

а) Каждые сутки в атмосферу Земли входит около 480 метеороидов с массами не меньше 1 кг. Часть этих метеороидов (около 30 %) достигают высот 30 км и меньше. Движение таких тел в атмосфере сопровождается ударными волнами и тепловыми взрывами, которые представляют реальную опасность для находящихся поблизости авиалайнеров.

б) Каждый год на Землю падает около 900 метеоритов, которые при входе в атмосферу имеют массы не меньше 1 кг. Хотя этот вывод основан на данных болидов «Прерийной Сети» [42, 43], из которых только один породил метеорит, оценка числа метеоритных падений, приведенная в других работах, не сильно отличается от нашей. В работе [30] оценено, что количество выпавших метеоритов из числа болидов, наблюдавшихся «Прерийной Сетью», составляет один—три.

в) Событие типа Тунгусского (диаметр тела 60 м, плотность 1 г/см³, $M \approx 10^{11}$ г) происходит один раз за $P = 1/N^*$ ($M \geq 10^{11}$) ≈ 180 лет. Полученная оценка следует из общей средней зависимости (20) и поэтому очень приближенная. Кроме того, в использованных данных нет какой-либо информации о потоке кометных тел. Если воспользоваться выводом [53], что ожидаемый поток кометных ядер на Землю с массой не меньше $5 \cdot 10^{17}$ г составляет $N = 2 \cdot 10^{-36}$ см⁻²с⁻¹ и принять, что распределение кометных ядер по массе имеет параметр $s \approx 2.0$, получим уравнение

$$\lg N_c = 8.22 - \lg M, \quad (21)$$

в котором N_c — интегральный поток кометных ядер с массой не меньше M на всю Землю за год. Тогда из зависимости (21) можно получить грубую оценку: событие типа Тунгусского происходит один раз за 600 лет.

г) Общий приток всех космических частиц и тел на Землю в диапазоне масс от 10^{-12} до 10^{22} г равен $4.2 \cdot 10^7$ кг/год. Оценка притока практически совпадает с результатом [5]: $5 \cdot 10^7$ кг/год. Приток космической пыли на Землю, найденный в работе [35] по измерениям на ИСЗ, по радарным и визуальным наблюдениям метеоров, близок по значению: $1.62 \cdot 10^7$ кг/год. Если за последний миллиард лет аккреция космического вещества Землей была постоянной, то радиус Земли увеличился за это время приблизительно на 4 см.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОТОК ТЕЛ НА ОСНОВАНИИ ДРУГИХ ДАННЫХ

В недавно опубликованной большой коллективной работе З. Цеплехи с коллегами [24] приведена детальная таблица данных интегрального притока космических тел на Землю в широком интервале масс. Поскольку источники для данных таблицы — и в первую очередь для мелких и средних частиц и тел — отличаются от использованных нами, мы сравнили полученные зависимости (19) или (20) с аппроксимацией, которая следует из таблицы [24] (рис. 2). По данным таблицы методом наименьших квадратов получена средняя интегральная зависимость в таком виде:

$$\lg N^{**} = 7.67 - 0.851 \lg M \quad (R^2 = 0.9903), \quad (22)$$

Если соотношение (22) переписать как интегральный приток числа тел с массой не меньше M через $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}(2\pi \text{ ср})^{-1}$, то получим следующее выражение:

$$\lg N_c^* = -18.55 - 0.851 \lg M. \quad (23)$$

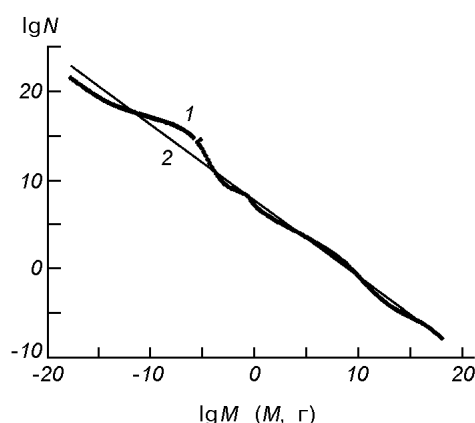
В работах [23, 24] приведены ссылки на источники данных для получения интегральной функции притока метеорных частиц. В области самых малых масс (12 порядков: от 10^{-18} до 10^{-6} г) использованы результаты [29], которые получены по измерениям лунных микрократеров (полагалось, что самые малые лунные микрократеры образованы β -метеороидами, которые имеют нижний предел массы 10^{-18} г). Имеются сомнения в корректности определения столь малых масс, вызывающих микрократеры на поверхности Луны. Во-первых, в работе [29] относительная эффективная скорость столкновения разных метеороидов с поверхностью Луны принимается равной 20 км/с. В то же время использованные источники [33, 44, 54] свидетельствуют о широком интервале возможных значений скорости, и судя по всему, она будет несколько меньше. Мы склонны считать, и для этого также имеются аргументы, что средняя скорость падения космических частиц на Луну равна примерно 16 км/с, хотя часть β -метеороидов с массами менее 10^{-14} г, наверное, может ускоряться солнечным световым давлением до высоких скоростей. Если средняя скорость столкновений будет меньше, то минимальная масса будет соответственно больше.

В работе [54], например, средняя ударная скорость для Луны составляет от 13 до 18 км/с. В работе [33] получена средняя скорость 8 км/с для частиц с массами от 10^{-13} до 10^{-10} г и около 17 км/с для меньших частиц. В работе [44] приведена ударная скорость для Луны до 100 км/с со средним значением 43 км/с для частиц с массой около 10^{-12} г. Только на этом основании не следует, что скорость частиц, которые могут образовывать кратеры на Луне, равна 20 км/с. Кроме этого, авторы работы [29] связывают кратерообразование с кинетической энергией падающих частиц, т. е. определяют минимальную массу на основании заданного квадрата скорости. Согласно работе Эпика [48] такие расчеты должны основываться на передаче количества движения, а не энергии. Теория [48] является на сегодня, с нашей точки зрения, наиболее точной, так как проверена и согласована с экспериментальными данными (для скоростей от 2 до 9 км/с) и по статистике лунных кратеров для скоростей до 40 км/с [49]. Как замечает Эпик, что энергия есть источник действия, а само действие не пропорционально энергии. Суть заключается в том, что взрыв не происходит в момент столкновения тел. Ударяющее тело некоторое время продолжает двигаться внутрь мишени (при этом значительная часть энергии уносится наружу), и для расчета такого движения необходимо пользоваться законом сохранения импульса, а не энергии. Точно так же, как мы используем закон сохранения импульса при расчете движения метеороида в атмосфере Земли, т. е. уравнение торможения, а закон сохранения энергии - при расчете потери массы (уравнение абляции). Однако авторы работы [29], видимо, не были знакомы с работами [48, 49].

На основании работы [48] можно получить, что минимальная масса частицы, образовавшая взрывной кратер с диаметром D_{\min} на поверхности Луны (при условии, что мы фиксируем какую-то определенную скорость), равна

$$M_{\min}^* \sim D_{\min}^3 V^{-1.4} (\cos Z_R)^{3/2}. \quad (24)$$

Рис. 2. Интегральный поток космических тел на Землю: 1 — согласно работе [23]; прямая линия 2 — наша аппроксимация (22)



Если придерживаться (как в работе [29]) условия, что размер взрывного кратера определяется кинетической энергией ударяющего тела, то

$$M_{\min} \sim D_{\min}^3 V^{-2}. \quad (25)$$

Качественно из приведенных соотношений (24) и (25) (для случая вертикального падения, при котором $\cos Z_R = 1.0$) следует, что

$$M_{\min}^* \sim M_{\min} V^{0.6}.$$

Если рассмотреть вопрос количественно, используя для получения точной зависимости (25) теорию Станюковича [18] и результаты нашей работы [10], то получим, что минимальные массы могут отличаться на порядок от тех, что приведены в работе [29] и используются З. Цеплейхой [24]. В работе [39], где также определяется поток пыли на основе данных лунных микрократеров, для определения массы частиц используется еще более грубое приближение: отношение диаметра кратера к диаметру ударника принимается в виде

$$D/d = 2 \quad (\text{для } D > 6 \cdot 10^{-4} \text{ см})$$

и

$$D/d = 3 \quad (\text{для } D \leq 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}).$$

Имеются многочисленные экспериментальные данные, где показано, что отношение D/d зависит от различных параметров ударника и мишени, но в первую очередь определяется скоростью столкновений. Например, в эксперименте [12], где в качестве ударников использовались почти сферические частицы из стали, алюминиевых сплавов, вольфрама и др., а мишени были из латуни, из стали либо из алюминиевых сплавов, установлена довольно надежная зависимость от скорости. Испытание проведено в интервале скоростей от 1 до 21 км/с. Экспериментальные результаты аппроксимированы следующими зависимостями:

$$\lg(D/d) = 0.571 \lg V + 0.086 \quad (\text{для } V = 1 \div 12 \text{ км/с}),$$

$$\lg(D/d) = 2.841 \lg V - 2.42 \quad (\text{для } V > 12 \text{ км/с}).$$

Если скорость столкновения мелких частиц с поверхностью Луны равна 16—20 км/с, то $D/d = 10 \dots 19$. Согласно работам [29, 39] так называемый «лунный поток» микрочастиц в области самых малых масс (от 10^{-13} до 10^{-18} г) превышает «межпланетный поток» для этих же масс почти на два порядка. Авторы объясняют это тем, что микрократеры на поверхности Луны, по которым определяется «лунный поток», образуются не только

β -метеороидами, но и «вторичными» частицами, вылетающими из образуемых кратеров. Судя по всему, эти «вторичные» микрократеры могут образовываться только при малых скоростях удара ($V \approx 1-2$ км/с). Только для этих частиц можно принимать $D/d = 1.2...1.8$. Вторичные частицы с большими скоростями по гиперболическим орбитам будут покидать лунную поверхность.

В работе [20] обсуждаются результаты измерений притока микрометеороидов, полученного на КА «Prospero» при помощи плазменных датчиков. Приток в среднем оказался равным $1.7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} (2\pi \text{ ср})^{-1}$ для микрометеороидов с массой $M > 10^{-15}$ г, что почти точно совпадает с данными, которые следуют из средней кривой (23). Величина потока пылевых частиц с массой $M > 1.8 \cdot 10^{-14}$ г исследовалась также по количеству высокоскоростных взрывных кратеров на пластинках, установленных на космическом аппарате «Gemini-12» [22]. При расчете авторы приняли плотности частиц 2.5 г/см^3 и скорости столкновений 20 км/с. Получен верхний предел потока частиц с массой $M > 1.8 \cdot 10^{-14}$ г и с $M > 10^{-12}$ г, который можно представить зависимостью для потока частиц за год на всю Землю:

$$\lg N^* = 5.95 - 1.23 \lg M.$$

Из этой зависимости следует, что величина потока частиц указанных выше масс на три порядка превышает поток таких же частиц согласно данным, которые приведены в работе [24] и представлены соотношением (23).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сравнения зависимостей (20) и (22) следует:

а) отношение средних интервалов (промежутков времени) между двумя падениями тел на Землю, вычисленных по этим формулам, зависит от массы и может быть представлено соотношением

$$T/T_c = 0.417M^{0.085}, \quad (26)$$

где T — интервал между двумя падениями тел, который следует из зависимости (19) или (20), T_c — интервал между двумя падениями тел согласно зависимости (22) или (23). Равенство частот падений тел для обеих аппроксимаций соответствует массе $3 \cdot 10^4$ г. При меньших массах формула (20) нашей зависимости дает большую частоту падений, чем формула (22), полученная по данным [24]. При больших массах формула (22) дает существенное увеличение частоты падений с увеличением массы по сравнению с зависимостью (20). Например, по формуле (22) событие типа Тунгусского происходит один раз за 50 лет, тогда как из соотношения (20) — один раз за 180 лет; для километрового тела, согласно (22), $T_c = 1.8 \cdot 10^5$ лет, а по формуле (20) $T = 1.5 \cdot 10^6$ лет;

б) как следствие увеличения числа падений крупных тел, суммарный приток космических тел на Землю в том же интервале масс (от 10^{-12} до 10^{22} г), согласно зависимости (22), равен $5.1 \cdot 10^8$ кг/год, т. е. на порядок больше, чем следует из (20). Если учесть только интервал масс от 10^{-18} до 10^{12} г, как это, вероятно, сделано в работе [29], то приток будет равен $1.5 \cdot 10^7$ кг/год. В данном случае при расчете общего притока по формуле (22) не имеет значения, какую минимальную массу выбирать: 10^{-12} г или 10^{-18} г — результат будет один и тот же;

в) согласно зависимости (22) каждые сутки в атмосферу Земли входит около 360 тел с массами не меньше 1 кг. За год на на всю Землю выпадает

приблизительно 700 метеоритов, начальная масса (масса при входе в атмосферу) которых не меньше 1 кг. По сравнению с нашей зависимостью (20) здесь получена меньшая частота падений, что и следовало ожидать согласно формуле (26).

Вряд ли можно однозначно определить, какая из приведенных средних аппроксимаций лучше представляет реальное распределение потока тел (частиц) на Землю в современную эпоху, хотя представляется, что в зависимости (22) преувеличено значение больших тел. В то же время в пользу более частых падений крупных тел, чем это следует из соотношения (20), могут свидетельствовать исследования [8], основанные на статистическом изучении эволюционной миграции тел и их столкновений в поясе астероидов. Эпик [47] в своем детальном анализе приходит к выводу, что прирост массы Земли в результате «ортодоксальной акреции», т. е. в результате прямых столкновений частиц с планетой, составляет около $2.5 \cdot 10^8$ кг/год с возможным отклонением, как считает автор, не более чем в три раза, т. е. результат близок к тому, что следует из зависимости (22). Мы полагаем, что различие аппроксимаций (20) и (22) и отличающиеся почти на порядок оценки в интегральном притоке космических тел на Землю отражают, прежде всего, низкую современную точность определения притока в различных интервалах масс. Об этом свидетельствуют и отдельные работы, о которых речь шла выше, и в которых различие потоков частиц для одних и тех же масс достигает нескольких порядков.

1. Бенюх В. В., Казанцев А. М., Калениченко В. В. и др. Результаты фотографических наблюдений метеоров в Киеве в 1967—1976 гг. II. Фотометрия // Вестник Киев. ун-та. Астрономия.—1988.—Вып. 30.—С. 68—81.
2. Бенюх В. В., Кручиненко В. Г., Шербаум Л. М. Результаты фотографических наблюдений метеоров в Киеве в 1957—1966 гг. I. Основные уравнения // Астрометрия и астрофизика.—1980.—Вып. 41.—С. 68—81.
3. Бенюх В. В., Кручиненко В. Г., Шербаум Л. М. Результаты фотографических наблюдений метеоров в Киеве в 1957—1966 гг. II. Фотометрия метеоров // Астрометрия и астрофизика.—1980.—Вып. 42.—С. 41—54.
4. Бронштэн В. А. Природа и происхождение метеороидов // Проблемы происхождения тел Солнечной системы / Под ред. В. К. Абалякина. — М.—Л.: АН СССР, 1975.—С. 265—301.
5. Бронштэн В. А. Анализ оценок притока метеорного вещества на Землю // Кометы и метеоры.—1982.—32.—С. 10—22.
6. Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л., Кручиненко В. Г. Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. думка, 1989.—294 с.
7. Звягина Е. В., Сафронов В. С. Распределение допланетных тел по массам // Астрон. журн.—1971.—48, № 5.—С. 1023—1032.
8. Ипатов С. И. Миграция малых тел к Земле // Астрон. вестник.—1995.—29, № 4.—С. 304—330.
9. Колмогоров А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределении частиц при дроблении // Докл. АН СССР.—1941.—31, № 2.—С. 99—101.
10. Кручиненко В. Г. Метеоритные кратеры на поверхности Земли // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 6.—С. 507—518.
11. Лебединец В. Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. — Л.: Гидрометеиздат, 1980.—247 с.
12. Леонтьев Л. В., Тарасов А. В., Терешкин И. А. Некоторые особенности формы кратеров, образованных высокоскоростными частицами в полубесконечной преграде // Космич. исслед.—1971.—9, № 5.—С. 796—798.
13. Мазец Е. П. Микрометеороиды в космическом пространстве // Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве / Под ред. Н. Б. Дивари. — М.: Наука, 1971.—С. 13—23.
14. Разумовский Н. К. Характер распределения содержаний металлов в рудных месторождениях // Докл. АН СССР.—1940.—28, № 9.—С. 815—817.
15. Разумовский Н. К. О значении логарифмически-нормального закона распределения частиц в петрологии и геохимии // Докл. АН СССР.—1941.—33, № 1.—С. 48—49.
16. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1968.—244 с.

17. Симоненко А. Н., Левин Б. Ю. Приток космического вещества на Землю // Метеоритика.—1972.—31.—С. 45—56.
18. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971.—855 с.
19. Baggaley W. J. The size distribution of large meteor bodies // Bull. Astron. Inst. Czech.—1978.—29, N 1.—P. 57—59.
20. Bedford D. K. Observations of the micrometeoroid flux from Prospero // Proc. Roy. Soc. London A.—1975.—343, N 1633.—P. 277—287.
21. Brown H. The density and mass distribution of meteoritic bodies in the neighborhood of the Earth's orbit // J. Geophys. Res.—1960.—65.—P. 1679—1683.
22. Brownlee D. E., Hodge P. W., Wright F. W. Upper limits to the micron and submicron particle flux at satellite altitudes // J. Geophys. Res.—1969.—74, N 3.—P. 876—883.
23. Ceplecha Z. Influx of interplanetary bodies onto Earth // Astron. and Astrophys.—1992.—263.—P. 361—366.
24. Ceplecha Z., Borovicka J., Elford W. G., et al. Meteor phenomena and bodies // Space Sci. Revs.—1998.—84.—P. 327—471.
25. Dainty A. M., Stein S., Toksuz M. N. Variation in the number of meteoroid impacts on the Moon with lunar phase // Geophys. Res. Lett.—1975.—2, N 7.—P. 273—276.
26. Dohnanyi J. S. Mass distribution of meteors // Astrophys. J.—1967.—149, N 3.—P. 735—737.
27. Dohnanyi J. S. Collisional model of asteroids and their debris // J. Geophys. Res.—1969.—74.—P. 2531—2554.
28. Dohnanyi J. S. On the origin and distribution of meteoroids // J. Geophys. Res.—1970.—75.—P. 3468—3493.
29. Grün E., Zook H. A., Fechtig H., Giese R. H. Collisional balance of the meteoric complex // Icarus.—1985.—62, N 2.—P. 244—272.
30. Halliday I., Blackwell A. T., Griffin A. A. The frequency of meteorite falls on the Earth // Science.—1984.—223, N 4643.—P. 1405—1407.
31. Hawkins G. S. Asteroidal fragments // Astron. J.—1960.—65, N 1.—P. 318—322.
32. Hawkins G. S., Upton E. K. L. The influx rate of meteors in the Earth's atmosphere // Astrophys. J.—1958.—128.—P. 727—735.
33. Hoffman H.-J., Fechtig H., Grün E., Kissel J. Temporal fluctuations and anisotropy of the micrometeoroid flux in the Earth—Moon system // Planet. Space Sci.—1975.—23.—P. 985—991.
34. Hughes D. W. Micrometeoroid density from lunar craters // Nature.—1974.—252, N 5479.—P. 94—95.
35. Hughes D. W. Cosmic dust influx to the Earth // Space res. 15. Proc. Open Meet. Work. Groups Phys. Sci. 17th Plen. Meet. COSPAR, Sao Paulo, 1974. — Berlin, 1975.—P. 531—539.
36. Klacka J. Mass distribution and structure of the asteroid belt // Acta Astron. Geophys. Univ. Comen.—1995.—17.—P. 62—76.
37. Kruchynenko V. G. Integrated density of space bodies onto Earth for a wide range of masses // METEORIDS 1998: Proc. Inter. Conf. Tatr. Lomn. / Eds W. J. Baggaley, V. Porubcan. — Bratislava: Astron. Inst. Slovak Acad. Sci., 1999.—P. 329—332.
38. Latham G. V., Eving M., Press F., et al. Passive seismic experiment // Apollo 16 Preliminary Science Report. — NASA, 1972.—P. 9.1—9.29.—(NASA SP—315).
39. Le Sergeant d'Hendecourt L. B., Lamy P. L. On the size distribution and physical properties of interplanetary dust grains // Icarus.—1980.—43.—P. 350—372.
40. McCrosky R. E. Distribution of Large Meteoritic Bodies // Smithsonian Astrophys. Observ. Spec. Rept.—1968.—N 280.
41. McCrosky R. E., Posen A. Orbital elements of photographic meteors // Smithsonian Contribs Astrophys.—1961.—4, N 2.—P. 15—84.
42. McCrosky R. E., Shao C.-Y., Posen A. Prairie network fireball data. I. Summary and orbits // Center for Astrophysics. Prep. Ser.—1976.—N 665.—13 p.
43. McCrosky R. E., Shao C.-Y., Posen A. Prairie network fireball data. II. Trajectories and light curves // Center for Astrophysics. Prep. Ser.—1977.—N 721.—61 p.
44. McDonnell J. A. M. Microparticle studies by space instrumentation // Cosmic Dust / Ed. by J. A. M. McDonnell. — Chichester: Wiley, 1978.—P. 337—426.
45. Nemtchinov I. V., Svetsov V. V., Kosarev I. B., et al. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // Icarus.—1997.—130, N 2.—P. 259—274.
46. Nilsson C. S., Southworth R. B. The flux of meteors and micrometeoroids in the neighborhood of the Earth // Spec. Rept. Smithsonian Astrophys. Observ.—1967, N 263.—13 p.
47. Öpik E. J. Interplanetary dust and terrestrial accretion of meteoric matter // Irish Astron. J.—1956.—4, N 3/4.—P. 84—135.
48. Öpik E. J. Interplanetary encounters. — New York: Elsevier scient. publ. comp., 1976.—155 p.
49. Öpik E. J. The lunar surface as an impact counter // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1960.—120.—P. 404—411.

50. *Rabinowitz D. L., Bowell E., Shoemaker E., Muinonen K.* The population of Earth-crossing asteroids // Hazards due to comets and asteroids / Ed. by T. Gehrels. — Tucson: Univ. of Arizona Press, 1994.—P. 285—312.
51. *ReVelle D. O.* Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves // Ann. N.Y. Acad. Sci.—1997.—822.—P. 284—302.—(Near-Earth Objects / Ed. by J. Remo).
52. *Tagliaferri E.* Satellite observations of large meteoroid impacts // Report at “Workshop on Satellite Observation of Meteoroid Impacts into the Atmosphere”. — Albuquerque, Sandia National Laboratories, May 1995.
53. *Whipple F. L.* On maintaining the meteoritic complex // Studies in interplanetary particles // Smithsonian Astrophys. Observ. Spec. Repr.—1967.—N 239.—P. 3—45.
54. *Zook H. A.* The state of meteoritic material on the Moon // Proc. Lunar Sci. Conf. 6th.—1975.—P. 1653—1672.
55. *Zook H. A., Flaherty R. E., Kessler D. J.* Meteoroid impacts on the Gemini windows // Planet. Space Sci.—1970.—18, N 7.—P. 953—964.

Поступила в редакцию 20.03.02