

**Специализированный учебно-научный центр –
Факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,
Школа имени А.Н.Колмогорова
Кафедра физики**

Практическая работа

Кузнецова И.В., Прохоров М.Е.

Оценка частоты падения астероидов на Луну и на Землю

Москва – 2016 г.

Цель работы

Целью работы является:

- Ознакомление с понятием астероидно-кометная опасность;
- Исследование возможных механизмов образования кратеров и расчет их размеров на Земле и на Луне в зависимости от параметров;
- Оценка частоты падения астероидов на Землю по фотографиям Луны.

Введение

Астероидно-кометная опасность (АКО) долгое время оставалась предметом изучения узкого круга специалистов. Теперь она перешла в разряд комплексной глобальной проблемы, стоящей перед человечеством. Причина изменения в том, что накопились такие фундаментальные знания о населенности Солнечной системы малыми телами, динамической и физической эволюции этого населения, о механизмах пополнения популяции опасных тел, о частоте столкновения малых тел с планетами, в том числе с Землей [1]. Этот прорыв обусловлен появлением новых наблюдательных технологий, специальных программ наблюдения, проектов по исследованию малых тел

солнечной системы. По своей сути проблема АКО – комплексная:

1. Теоретическая оценка АКО по современным данным.
2. Проблема обнаружения всех опасных тел и определение их свойств.
3. Проблема противодействия и уменьшения ущерба.
4. Проблема кооперации в подходе к глобальной проблеме АКО.

В чем опасность и каков ее уровень

Столкновения Земли с малыми космическими телами происходили всегда. В геологической истории Земли сохранилось много свидетельств падения на Землю крупных (размером более 1 км) тел. Примером того, что столкновения малых тел Солнечной системы с планетами продолжаются, является падение в 1994 г. кометы Шумейкеров-Леви–9 на Юпитер, а также Тунгусская катастрофа (1908 г.) и Челябинский метеорит (2013 г.). Падение таких космических тел приводит к выделению большой энергии. Согласно подсчетам специалистов при падении тунгусского метеорита в тротиловом эквиваленте энергия составляла 15 мегатонн.

Обычно в результате на поверхности при ударе образуются ударные кратеры, диаметры которых превышают размеры упавшего тела. На Земле на суше и на дне океанов и морей обнаружены около 200 кратеров – следов подобных катастроф. Самый большой из них – кратер Вредефорт в ЮАР – имеет в диаметре 300 км и возраст около 2 млрд. лет. Кратер Чиксулуб, диаметром 180 км образовался на дне Мексиканского залива при падении 10 километрового тела 65 млн. лет тому назад. Возможно, он привел к вымиранию динозавров.

На поверхности других планет, спутников планет и даже астероидов наблюдается огромное количество ударных кратеров. Кроме того, следы ударов на геологически пассивных телах не имеющих атмосферы прекрасно сохраняются в течение миллиардов лет и позволяют восстановить свойства тел–ударников, частоты соударений, характеристики энергетического процесса, т. е. механизмов выброса, перераспределения энергии и вещества и другую важную информацию.

На Земле подавляющая часть этой информации утеряна практически навсегда. Эрозивные процессы на суше и в море, геологическая активность земной коры, в том числе

движения материковых плит, в течение нескольких миллионов лет приводят к полному изменению облика нашей планеты.

Сближаться с Землей при движении в пространстве и падать на нее могут любые малые тела. Термин «малые тела Солнечной системы» охватывает широкий набор объектов, которые принято подразделять в зависимости на межпланетную пыль, метеороиды, астероиды и кометы. Главный параметр классификации – размер тел. Характерные размеры малых тел приведены на рис 1.

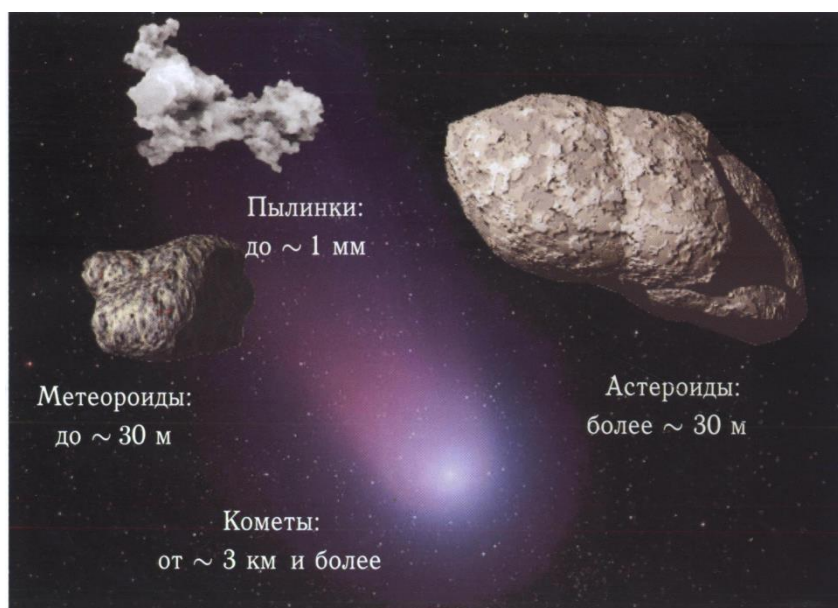


Рисунок 1 – Классификация малых тел Солнечной системы

Оценки притока метеорного вещества на Землю лежат в пределах 10–300 тыс. тонн в год. Долетит или не долетит тело до поверхности Земли, зависит от многих параметров:

размеров, скорости, состава и структуры тела. Наиболее устойчивы к разрушению при пролете в атмосфере железные метеориты и метеороиды, образовавшиеся, по-видимому, в результате распада ядер комет. Так распад ядра кометы Швассмана-Вахмана весной 2006 г. стал наблюдаемым свидетельством того, что в образовавшемся рое содержатся тела размерами до сотен метров в диаметре. Причем, наличие крупных (до 40 м) тел в метеорных и болидных потоках впервые было выявлено в наблюдениях, начатых в РАН в начале 1990-х годов XX века.

Пока не началось массовое проникновение человека в космическое пространство, имеет смысл говорить только об угрозе столкновений с Землей достаточно крупных тел: астероидов и крупных фрагментов комет размером не менее нескольких десятков метров. Именно такие угрозы составляют смысл понятия астероидно-кометной опасности.

Данная работа посвящена некоторым аспектам АКО. Для оценки частоты падения космических тел на поверхность Земли привлекаются фотографии Луны, сделанные из космоса. Это возможно потому, что Луна и Земля движутся практически по одной орбите вокруг Солнца и подвергаются бомбардировке одними и теми же

малыми телами. Для оценок взяты изображения той части Луны, которая менее всего подверглась вулканической деятельности (лунные «материки»).

Как было сказано выше, Земля сохранила слишком мало свидетельств, пригодных для частотного анализа, но то, что и Земля и Луна согласно современным концепциям их происхождения образовались в одно время и наиболее сильным бомбардировкам из космоса подвергались одновременно, позволяет привлечь нашего спутника для подобных оценок.

Для оценок размеров ударных кратеров использовались простые физические модели, а также новейшие научные данные, публикуемые в открытом доступе.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Торможение метеоритов и астероидов до удара о твердую поверхность Земли.

Упражнение 1. Оценка радиуса метеорита, которому испытывает заметное торможение в атмосфере Земли.

Известно, что плотность атмосферы быстро убывает с высотой. Если же уплотнить атмосферу до однородного состояния, то толщина такого слоя составит около $H_0 = 8000$ м.

Метеорит «почувствует» сопротивление воздуха, если масса метеорита и масса столба воздуха, с которым он взаимодействует, примерно равны. Поскольку высота атмосферы мала по сравнению с радиусом Земли, то можно считать, что внутри атмосферы метеорит движется по прямой. В этом случае столб воздуха – это цилиндр высотой $H = H_0 \sin \alpha$, где α – угол между направлением движения метеорита и горизонтом. Диаметр этого цилиндра равен (или немного больше) диаметра метеорита. Приравняем массу метеорита и «цилиндра» из воздуха, считая траекторию метеорита близкой к вертикали:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{мет}} = \pi r^2 H \rho_{\text{возд}}. \quad (1)$$

Откуда получаем:

$$r = \frac{3}{4} \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho_{\text{мет}}} H \approx 2,25 \text{ м}. \quad (2)$$

Классификация метеоритов по составу приведена на рис П.1, а плотность метеоритов и малых космических тел приводится в таблице П.1 (в Приложении).

Плотность воздуха известна и составляет $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Задание 1. Выберите несколько значений плотности метеоритного вещества.

Подставляя выбранные вами значения в формулу (2), получите оценку диаметров метеоритов различной плотности, которые испытывают значительное сопротивление воздуха.

Полученные данные занесите в таблицу.

Упражнение 2. Оценка радиуса метеорита, который не даст кратера на дне океана.

Падение метеорит в океан не приведет к образованию на его дне кратера, если при движении сквозь воду скорость метеорита снизится до скорости звука в земной коре.

Торможение метеорита в толще воды происходит так же, как в атмосфере, за счет взаимодействия со столбом воды, вдоль которого движется метеорит. Если метеорит пересекает поверхность океана со скоростью V_0 , а при достижении дна океана скорость уменьшается до V_d ($V_d < V_0$), то масса столба воды определяется соотношением

$$\frac{\pi r^2 G_B \rho_B}{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{мет}}} = \frac{V_0}{V_d} - 1, \quad (3)$$

где ρ_B – плотность морской воды, которая колеблется от 1020 до 1030 кг/м³, $G_B = G_0 \sin \alpha$ – длина столба морской воды, G_0 – средняя глубина мирового океана (4280 м), а α – угол

между направлением движения метеорита и горизонтом. Отсюда получаем

$$r = \frac{3\rho_B}{4\rho_{\text{мет}}} \cdot \frac{V_d}{V_0 - V_d} G_B. \quad (4)$$

Скорость звука в Земной коре (в граните) составляет 5,4 км/с. Если скорость падения тела в океан составляет 20 км/с, то радиус вертикально падающего метеорита, с плотностью 3200 кг/м³, который будет остановлен тощей воды, составит 370 м.

Задание 1. Выберите несколько значений плотности метеоритного вещества.

Подставляя выбранные вами значения в формулу (4), получите оценку диаметров метеоритов различной плотности, которые останавливаются толщей океана. Полученные данные занесите в таблицу.

2. Исследование возможных механизмов образования кратеров и расчет их размеров на Земле и на Луне в зависимости от параметров.

При анализе изображений ударных кратеров, видно, что большинство из них окружено валом выброшенного вещества. У некоторых кратеров наблюдаются «лучи» –

вещество выброшенное на расстояние в несколько их диаметров (см. рис. 2).

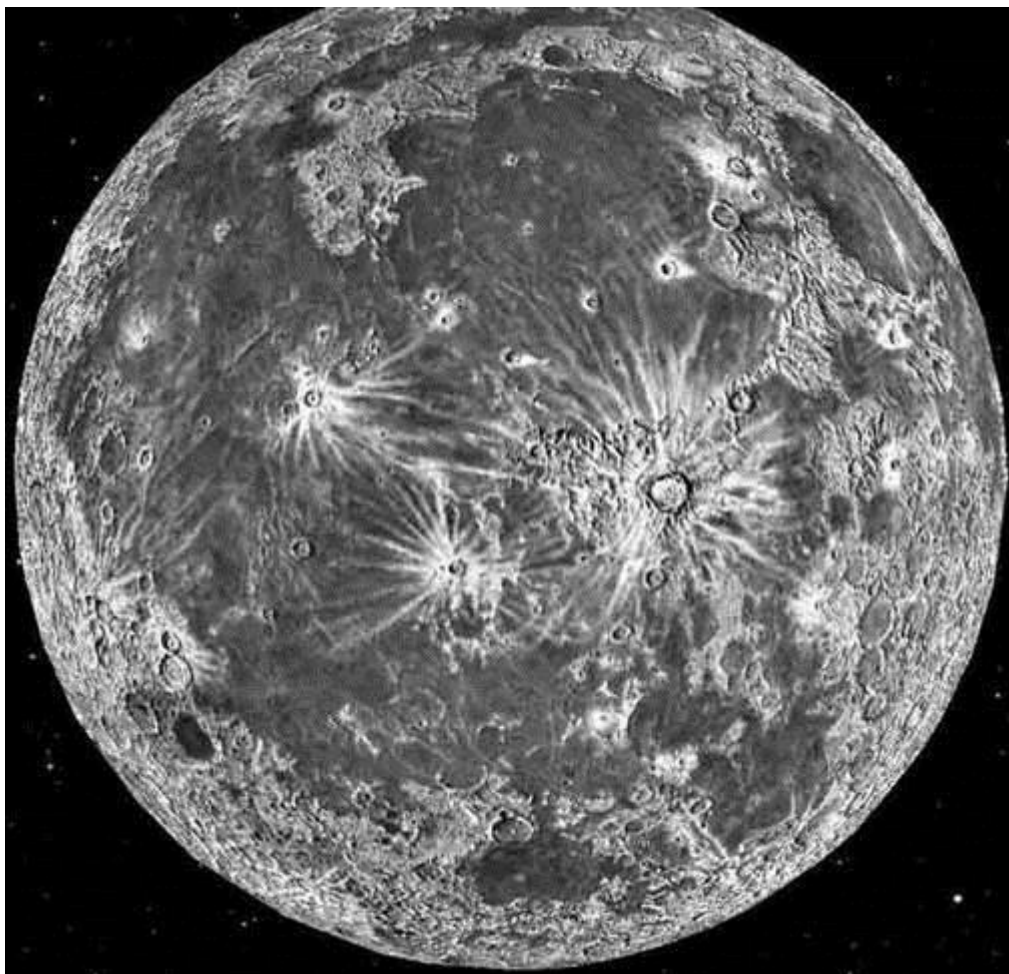


Рисунок 2 – Светлые «лучи» у кратеров на Луне: кратеры Аристарх, Кеплер, Коперник (слева направо)

Простые оценки показывают, что в момент удара в центре кратера достигается очень высокая температура при которой вещество поверхности плавится, а, возможно, и испаряется. Очевидно, что эти механизмы действуют одновременно – часть вещества дробится на мелкие фракции и выбрасывается из воронки, другая часть плавится и испаряется. Помимо этого, часть энергии удара

уходит в излучение, в звуковую (на планетах с атмосферой) и сейсмическую волны. В нашем грубом анализе мы будем рассматривать только два первых механизма образования кратеров.

Упражнение 3. Рассмотрим образование кратера при плавлении и/или испарении вещества энергией выделившейся при столкновении метеорита с Землей.

Будем считать, что вся кинетическая энергия выделилась в теплоту, выплавив в поверхности небесного тела кратер полусферической формы. Большинство пород имеют сложный состав и не имеют точной температуры плавления. В этом случае энергия уходит на нагрев вещества внутри кратера до температуры плавления:

$$m_{\text{кр}} c T_{\text{пл}} = m_{\text{мет}} V^2 / 2 \quad (5)$$

здесь $m_{\text{кр}}$ – масса грунта внутри кратера, c и $T_{\text{пл}}$ – его удельная теплоемкость и температура плавления, $m_{\text{мет}}$ – масса метеорита и V – скорость соударения.

Масса метеорита и грунта можно выразить через их средние радиусы и плотности, считая метеорит сферой, а кратер – полусферой:

$$m_{\text{кр}} = \frac{2\pi}{r} r_{\text{кр}}^3 \rho_{\text{кр}}; \quad m_{\text{мет}} = \frac{4\pi}{r} r_{\text{мет}}^3 \rho_{\text{мет}}. \quad (6)$$

Подставляя массы в предыдущее уравнение получаем радиус кратера

$$r_{\text{кр}} = \left(\frac{\rho_{\text{мет}}}{\rho_{\text{кр}}} \cdot \frac{V^2}{cT_{\text{пл}}} \right)^{1/3} r_{\text{мет}}. \quad (7)$$

Несколько иначе оценивается размер кратера, образующегося в ледяной поверхности. Вода (лёд) – вещество, которое имеет точно определенные температуры плавления и испарения (кипения). Помимо этого эти температуры достаточно низкие. При ударе метеорита о поверхность лед плавится, затем вода нагревается до температуры кипения и испаряется. Пар покидает кратер, унося тепло. В этом случае формула (5) превращается в

$$m_{\text{кр}} (L + c(T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}}) + Q) = m_{\text{мет}} V^2 / 2, \quad (8)$$

где L – удельная теплота плавления льда, Q – удельная теплота испарения воды, c – теплоемкость воды, $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{исп}}$ – температуры плавления льда и кипения воды, соответственно. Значения этих параметров приведены в табл. П.3. Подставляя в эту формулу массы, получаем

$$r_{\text{кр}} = \left(\frac{\rho_{\text{мет}}}{\rho_{\text{кр}}} \cdot \frac{V^2}{L + c(T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}}) + Q} \right)^{1/3} r_{\text{мет}}. \quad (9)$$

Для наших оценок возьмем скорость падения метеорита из распределения, приведенного на рис. П.2, будем считать, что скорость метеорита V примерно равна 20000 м/с.

Положим $\rho_{\text{кр}}$ плотность грунта равной 1000 кг/м³, $\rho_{\text{мет}}$ – плотность метеорита равной 3200 кг/м³, а тепловые параметры льда (воды) возьмем из таблицы П.3, тогда из (9) получим следующую примерную формулу

$$r_{\text{кр}} \approx 3,5 r_{\text{мет}}. \quad (10)$$

Задание 2. Выберите несколько значений для скорости и плотности метеорита и параметров грунта и получите формулы для связи размера кратера и размера метеорита. Значения берутся из таблиц и рисунков в Приложении.

Подставляя эти значения в формулу (9) получаем приближенные формулы

$$r_{\text{кр}} \approx C_1 r_{\text{мет}},$$

где коэффициент C_1 зависит от выбранных значений.

Упражнение 4. Рассмотрим случай, когда грунт выбрасывается из воронки.

Будем считать, что вся энергия метеорита переходит в кинетическую энергию выбрасываемого грунта. Энергию, затрачиваемую на его дробление и нагрев, будем считать малой, по сравнению с кинетической. В этом случае

вещество должно приобрести скорость, достаточную для его поднятия на высоту равную радиусу кратера в поле тяготения планеты. Эта энергия равна

$$E = m_{\text{кр}} r_{\text{кр}} g, \quad (11)$$

$$m_{\text{кр}} r_{\text{кр}} g = m_{\text{мет}} V^2 / 2, \quad (12)$$

здесь g – ускорение свободного падения на поверхности планеты.

Массы метеорита и грунта в кратере вычисляются аналогично предыдущему случаю.

Преобразуя выражение (12) получаем:

$$r_{\text{кр}}^4 = \frac{V^2}{g} \cdot \frac{\rho_{\text{мет}}}{\rho_{\text{кр}}} \cdot r_{\text{мет}}^3$$

или, окончательно,

$$r_{\text{кр}} = \sqrt[4]{\frac{V^2}{g} \cdot \frac{\rho_{\text{мет}}}{\rho_{\text{кр}}} \cdot r_{\text{мет}}^3} \quad (13)$$

Задание 1: Выберите из таблиц данные для расчета радиусов кратера аналогичные первому случаю и, подставляя данные в формулу (12), получите окончательную приближенную формулу:

$$r_{\text{кр}} \approx C_2 r_{\text{мет}}^{3/4}, \quad (14)$$

где коэффициент C_2 зависит от выбранных данных.

3. Влияние гравитации планет на падение на них метеоритов.

Упражнение 5. «Гравитационная фокусировка» набегающего на планету потока метеоритов (астероидов)

Свяжем систему отсчета с планетой и рассмотрим группу тел, движущихся навстречу планете. Вдали от нее скорости этих тел параллельны друг другу и равны v_∞ (см. рис. 3). При приближении к планете силы гравитации отклоняют летящие тела от прямолинейной траектории. Каждое тело движется по гиперболе.

Для системы планета – тело справедлив закон сохранения момента импульса:

$$mv_\infty b = mv(R)R \sin \phi = mv_{\max} r_{\min}, \quad (15)$$

где m – масса тела, v_∞ – вдали от планеты, b – прицельный параметр – расстояние от тела до оси, проходящей через центр планеты параллельно v_∞ .

$v = v(R)$ – скорость тела на расстоянии R от центра планеты, ϕ – угол между скоростью и радиус вектором в этот момент. При максимальном приближении к планете на расстояние $r_{\min}$ скорость становится максимальной $v_{\max}$.

Для тела в поле тяготения планеты выполняется закон сохранения энергии:

$$E = \frac{1}{2}mv_{\infty}^2 = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R}. \quad (16)$$

$\frac{GMm}{R}$ – потенциальная энергия метеорита в поле тяготения планеты. Отсюда следует формула

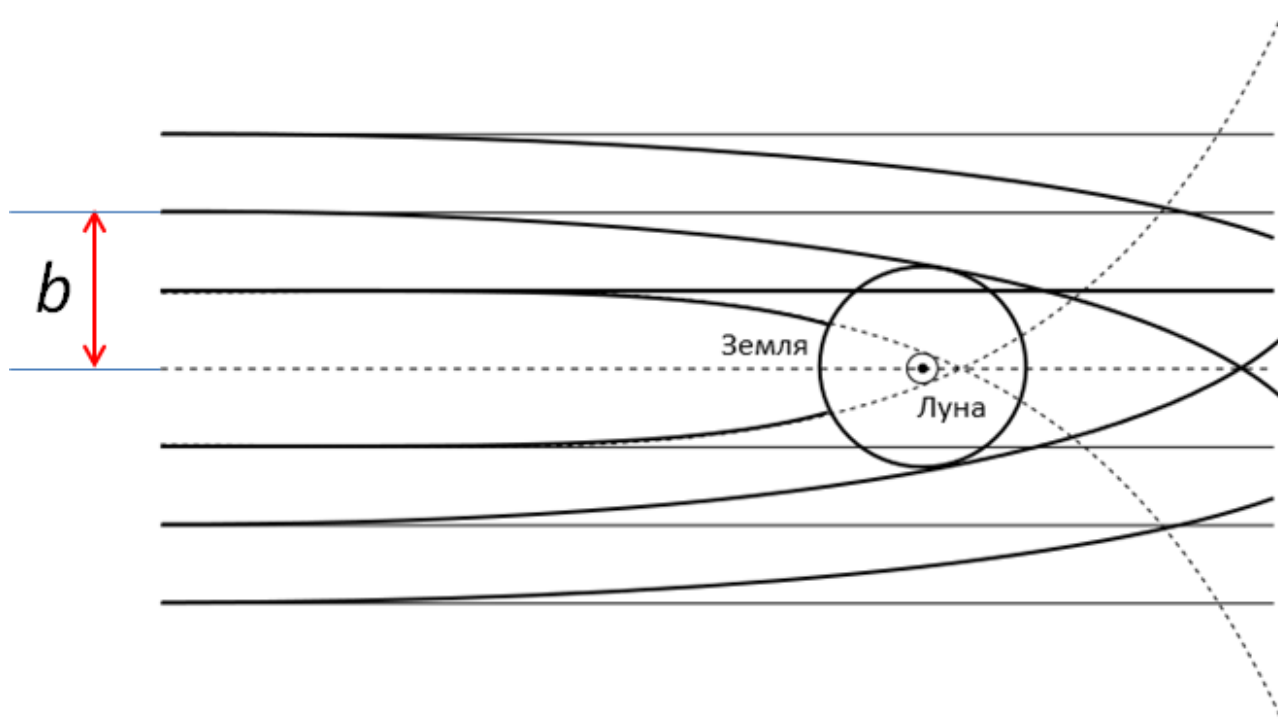


Рисунок 3 – Гравитационная «фокусировка» потока астероидов планетой

$$v^2 = v_{\infty}^2 + \frac{2GM}{R}. \quad (17)$$

Из (15) и (17), следует $v_{\infty}^2 + \frac{2GM}{R} = v_{\infty}^2 \frac{b^2}{R^2}$ делим на v_{∞}^2 .

Получаем $b^2 = R^2 \left(1 + \frac{2GM}{Rv_{\infty}^2} \right)$ и, далее

$$b = R \sqrt{1 + \frac{2GM}{Rv_{\infty}^2}}. \quad (18)$$

Заметим, что величина $2GM/R$ – квадрат второй космической скорости v_2^2 , той, которая позволяет телу, преодолев притяжение планеты, улететь в космос с ее планеты. Тогда выражение (18) можно записать так

$$b = R \sqrt{1 + \frac{v_2^2}{v_\infty^2}}. \quad (19)$$

Тела, у которых $r_{\min}$ меньше радиуса планеты $R_{\text{пл}}$, сталкиваются с ней, остальные – пролетают мимо. Соответственно, из условия $r_{\min} = R_{\text{пл}}$, можно определить значение $b_{\min}$, тела с $b < b_{\min}$ сталкиваются с планетой, с $b > b_{\min}$ – нет.

Задание 1. Оцените прицельный параметр $b_{\min}$ для Земли, используя несколько значений для скоростей метеоритов из Приложения.

Задание 2. Получите среднее значение для прицельного параметра и оцените эффективную поверхность захвата, т. е. площадь поверхности сферы, на которую попадают метеориты захваченные гравитацией Земли.

Задание 3. Повторите те же расчеты для Луны.

Задание 4. Получите связь между прицельным параметром и радиусом Земли для средней скорости полета метеоритов.

Задание 5. Оцените по той же схеме прицельный параметр для Луны, учитывая, что вторая космическая скорость для нее $v_2 = 2\,380$ м/с

Задание 6. Оцените во сколько раз влияние гравитации изменяет частоту столкновений с Землей по сравнению с Луной, сравнивая эффективные поверхности захвата.

II. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Теперь сделаем приблизительную оценку частоты падений различных тел на Луну.

Упражнение 6. Измерение размеров кратеров на участке поверхности Луны по фотографии из открытого архива космических аппаратов Lunar-Orbiter [2].

Кадр, использованный в этой работе, показан на рис. 4. Диаметры отмеченных на снимке кратеров приведены в таблице П.4 в приложении. Для удобства проведения подсчетов кадр был разбит на 15 фрагментов, набор которых предлагается в качестве рабочего материала.

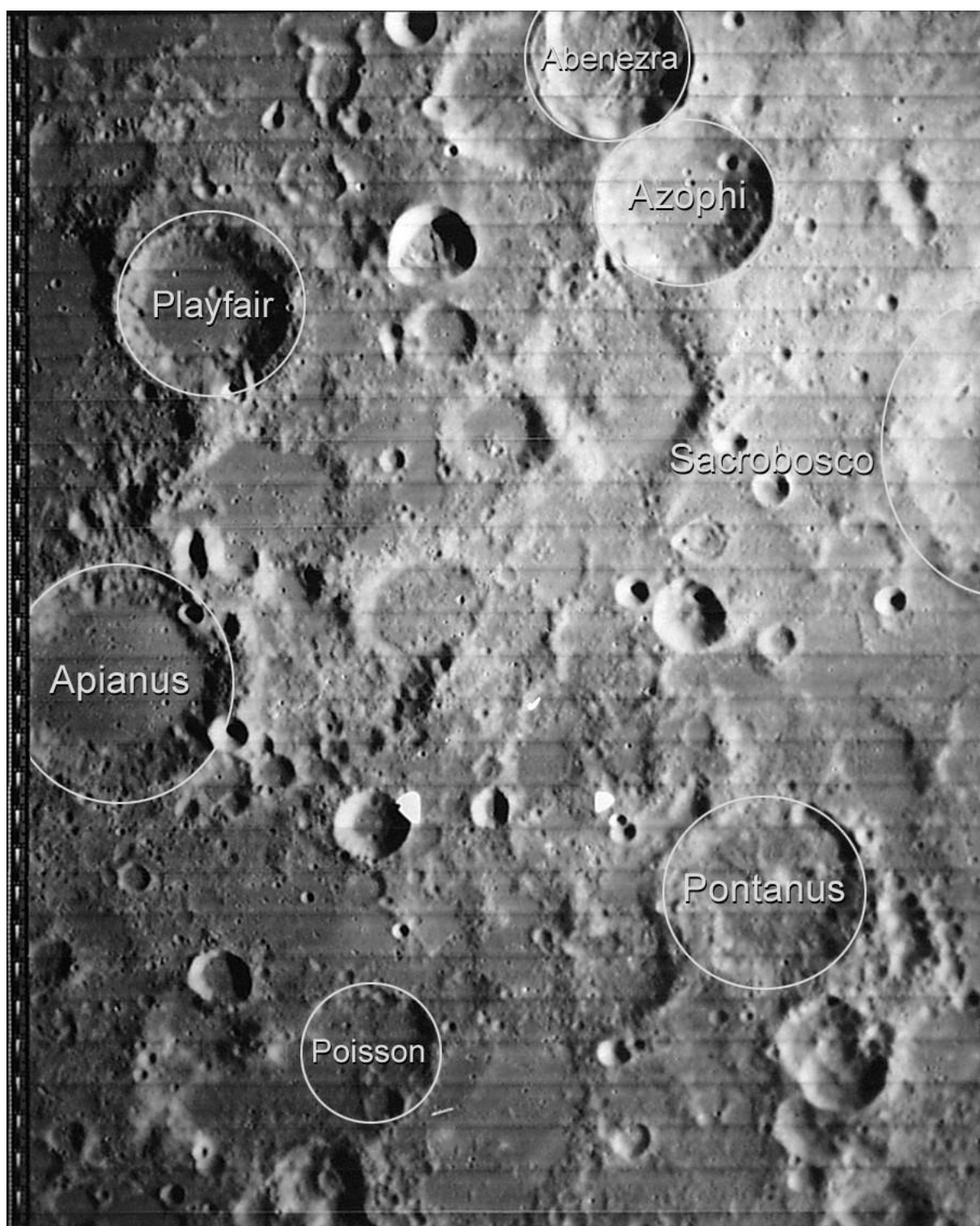


Рисунок 4 – Кадр поверхности Луны из архива Lunar-Orbiter

Задание 1. Используя увеличенное изображение фотографии (рис. 4), измеряйте с помощью линейки размер

каждого из 15 фрагментов и вычислите размер кадра в миллиметрах.

Задание 2. Совмещая поочередно пронумерованные листы с фрагментами изображения, измеряйте линейкой размеры обведенных кратеров и занесите данные в таблицу, где указаны размеры этих кратеров в километрах.

Задание 3. Вычислите масштаб для каждого кратера и посчитайте среднее значение. Занесите полученные данные в таблицу.

Для справки: исследования Луны с помощью фотографии в астрономических наблюдениях, применялось, начиная с середины 19 века. Такие фотографии были сделаны, в частности, Уорреном де ла Рю (1852.) и Льисом Резерфордом (1865.)

Упражнение 7. Подсчет кратеров на фрагменте изображения

Согласно многочисленным подсчетам кратеров их распределение по размерам имеет степенной вид [1].

Для работы с фрагментом изображения используется измеритель из школьной готовальни.

Для расчетов можно использовать от одного до всех 15 фрагментов изображения.

Задание 1.

- Выберите лист с обрабатываемым фрагментом фотографии
- Найдите на нем самое маленькое изображение кратера
- Раздвиньте ножки измерителя на это расстояние
- Посчитайте количество кратеров данного диаметра на всем листе, прокалывая лист иглами измерителя по диаметру посчитанного кратера.
- Занесите данные в таблицу
- Выберите следующий кратер, больший по размеру.
- Повторите ваши измерения.
- Постройте график зависимости числа посчитанных кратеров от их размеров.

Упражнение 8. Определение частоты падений метеоритов на Луну по числу кратеров

Задание 1. Используя факт о возрасте Луны около 4,5 млрд. лет, определите среднюю частоту падения на Луну тел, образующих кратеры диаметром $D = 1 \dots 98$ км.

Задание 2.

- Определите частоту падения метеорных тел на единицу поверхности Земли с учетом прицельного параметра для кратеров с $D = 1 \dots 98$ км.

- Проведите пересчет на всю поверхность Земли (включая океаны). Отметим, что полученные значения – средняя частота падения объектов за все время существования Земли (4,5 млрд. лет).

В отличие от Луны на Земле можно обнаружить либо самые молодые кратеры, еще не уничтоженные эрозией, либо наиболее крупные. Сегодня на Земле известно около 200 кратеров с доказанным ударным происхождением. Из них только 40 пригодны для статистического анализа: т.е. имеют диаметр более 3 км и возраст менее 250 млн. лет, и точность датировки лучше, чем 10 млн. лет. Средний возраст этих кратеров составляет примерно 50 млн. лет [3], что примерно в 50–100 раз меньше, чем на Луне.

Анализ ударных кратеров на Земле показывает что, падение тел, создающих кратеры диаметром $D > 1$ км, происходит примерно один раз в 1000 лет [4]. (Следует заметить, что из-за малого числа обнаруженных кратеров и из-за эффектов эрозии эта оценка не очень точна.)

- Сравните частоту образования кратеров на Земле по литературным данным и на Луне по вашим расчетам и объясните полученные результаты.
- Запишите выводы о проделанной работе в отчет.

Контрольные вопросы:

1. Какие угрозы составляют смысл астероидно-кометной опасности?
2. Приведите классификацию малых тел Солнечной системы.
3. Почему для оценки частоты падения космических тел на поверхность Земли можно привлекать данные о кратерах на Луне?
4. Почему масса столба воздуха и масса метеорита должны быть примерно одинаковы, для того чтобы метеорит эффективно тормозился в атмосфере?
5. Как влияет атмосфера на метеориты большего и меньшего размера?
6. Воспользовавшись полученными вами формулами, рассчитайте размеры кратеров для разных механизмов их образования при различных радиусах метеоритов.
7. Во сколько раз изменяется частота столкновений с Землей по сравнению с Луной из-за фактора гравитации?

Литература

1. Астероидно-кометная опасность. Вчера, сегодня, завтра // М.: Физматлит, 2010. 396 с.
2. Ссылка на архив фотографий Луны с аппаратов Lunar-Orbiter // <http://www.lpi.usra.edu/resources/lunarorbiter/>
3. Napier W.M. Evidence for cometary bombardment episodes // Mon. Not. Royal Astron. Soc. V. 366. P. 977–982. 2006.
4. Медведев Ю.Д. и др. Астероидно-кометная опасность / под ред. А.Г Сокольского // С.-Пб.: ИТА РАН. 1996. 244 с.
5. Зигель Ф.Ю. Вещество Вселенной // М.: Химия, 1982. – 176 с.
6. Бусарев В.В. Метеоры и метеориты // URL: <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/meteorits/meteorits.htm>
7. Фундаментальные космические исследования. Кн. 2. Солнечная система / под ред. Г.Г. Райкунова // М.: Физматлит. 2014. – 457 с.
8. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / ГОУ ВПО «Ивановский

государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с.

9. Горная энциклопедия. Т.1–Т.5 / гл. ред. Е.А. Козловский // М.: Советская энциклопедия. 1984–1991.
Url: <http://www.mining-enc.ru/>
10. McNamara H., Suggs R. Meteoroid Engineering Model (MEM): A Meteoroid Model for the Inner Solar System // Earth, Moon, and Planets. V. 95. P. 123–139. 2004.
11. Cour-Palais B.G. Meteoroid Environment Model-1969 // NASA SP-8013, 1969.
12. Anderson B.J. Review of Meteoroids/Orbital Debris Environment // NASA SSP 30425, Revision A, 1991. (модель NASA90).

ПРИЛОЖЕНИЯ



Рисунок П.1 – Классификация метеоритов по составу

Таблица П.1 – Средние плотности метеоритов, астероидов и комет (плотность в г/см³)

Тип объекта	метеориты [5]			
Подтип	хондриты [6]	каменные,	железно- каменные	железные
Плотность	2,2-3,2	3,5	5,0	7.7
Тип	астероиды (метеороиды) [7]			
Подтип	class C (углеродные)	class S (кремниевые)		class M (железные)
Плотность	1,4	2,7		5,3
Тип	кометы [7]			
Плотность	0,6 (0,2–1,0)			

Таблица П.2 – Параметры некоторых грунтов [8, 9]

Порода	Плотность, г/см ³	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Температура плавления, °С
Базальт	2,8–3,1	0,84	1100 – 1200
Гранит	2,5–2,7	0,79	950
Известняк	1,4–2,0	0,88	900 (разложение)
Песчаник	1,9–2,6	0,71	1700
Глина	1,6–2,9	0,88	1300–1600

Таблица П.3 – Характеристики льда

Состояние	Плотность	Теплоем- кость	Температура плавления	Удельная теплота плавления	Температура кипения	Удельная теплота испарения
Ед. изм.	кг/м ³	Дж/(кг·К)	°С	Дж/кг	°С	Дж/кг
Лёд	920	$2,1 \cdot 10^3$	0	$3,3 \cdot 10^5$	–	–
Вода	1000	$4,2 \cdot 10^3$	–	–	100	$2,3 \cdot 10^6$

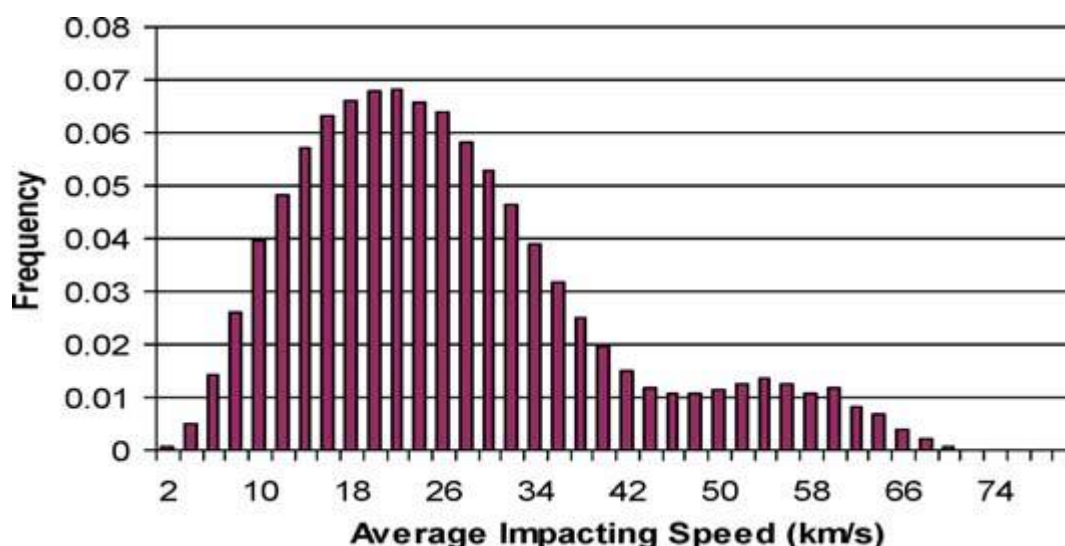


Рисунок П.2 – Распределение метеоритов по скорости движения относительно Земли [10]

Приведенная гистограмма показывает относительную частоту появления вблизи Земли малых тел с соответствующими относительными скоростями. Скорости меняются от 0 км/с (для тела движущегося по орбите Земли

в ту же сторону, что и Земля) до 72 км/с (для тела движущегося с параболической скоростью навстречу Земле). Средняя скорость малых тел в приведенном распределении составляет 23,9 км/с. Для вычисления скорости падения на поверхность Земли или Луны необходимо воспользоваться формулой

$$v_{\Pi} = \sqrt{v^2 + v_2^2}, \quad (20)$$

где v_{Π} – скорость падения на поверхность планеты, v – скорость движения относительно планеты, v_2 – вторая космическая скорость для планеты.

Существуют другие оценки скоростей падения малых тел на поверхность Земли, дающих несколько более низкие средние скорости, они приведены на рисунках П.3 и П.4. Ни них изображены уже скорости падения на поверхность Земли, которая меняется от 11,2 до 72.2 км/с.

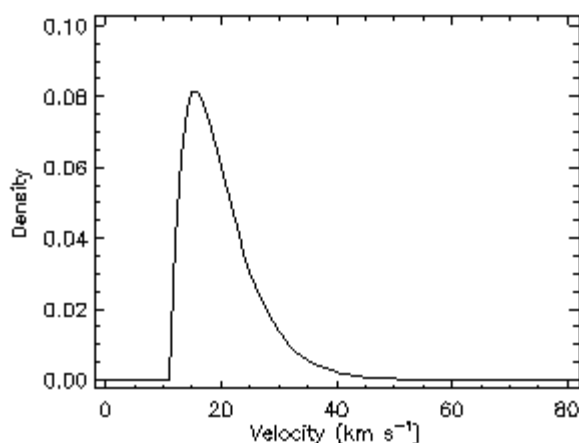


Рисунок П.3 –
Распределение скоростей
малых тел из работы
Cour-Palais [11].
Средняя скорость – 20
км/с

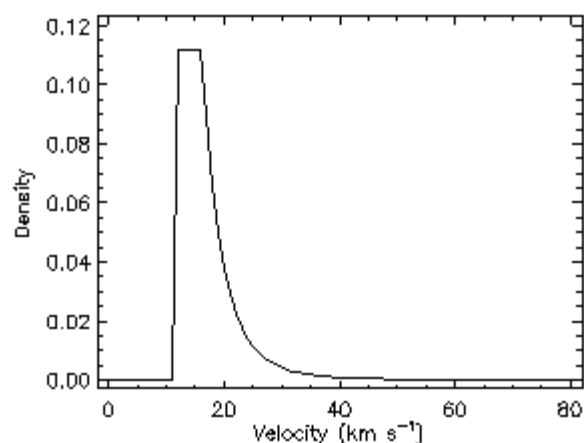


Рисунок П.4 –
Распределение скоростей
малых тел из работы [12].
Средняя скорость – 17
км/с

Таблица П.4 – Размеры кратеров на рис. 4

Название кратера (на английском)	Координаты кратера (широта / долгота)	Диаметр кратера (км)
Abenezra	21.0°с.ш. / 11.9°в.д.	42
Arrianus	26.9°с.ш. / 7.9 в.д.	63
Azophi	22.1°с.ш. / 12.7°в.д.	47
Playfair	23.5°с.ш. / 8.4°в.д.	47
Poisson	30.4°с.ш. / 10.6°в.д.	42
Pontanus	28.4°с.ш. / 14.4°в.д.	57
Sacrobosco	23.7°с.ш. / 16.7°в.д.	98