



Лукьянов Андрей Александрович

*Кандидат физико-математических наук, доцент,
лаборатория по работе с одарёнными детьми МФТИ.*

Об ударе из космоса и о вымирании динозавров

Приведена оценка энергии, выделившейся при падении на Землю 65 млн лет назад космического тела. Эта катастрофа, как считают, привела к вымиранию динозавров. Проведено сравнение энергии при этом столкновении и при столкновении в 1994 г. с Юпитером кометы Шумейкер – Леви-9.

Многие, уверен, слышали о том, что по современным представлениям **причиной вымирания динозавров** примерно 65 млн лет назад был **удар в Землю из космоса** некоего большого космического тела – метеорита, астероида, кометы – сейчас трудно сказать. Во всяком случае, о самом ударе говорят, как о чём-то само собой разумеющемся; это вошло в научно-популярные книжки, об этом сняты фильмы **BBC** и **National Geographic**.

На чём, однако, основана такая уверенность учёных?

Автор узнал о Космическом ударе в 1983 г. из №1 нового тогда у нас в стране журнала «**В мире науки**» (перевод на русский журнала **Scientific American**). Писалось в те годы об этом

осторожно – как о **предположении**, как **об одной из гипотез** (наряду с гипотезой сильного вулканизма в ту эпоху).

Вскоре, однако, ситуация изменилась. Уже лет через 15 автор читал о Космическом ударе в популярных книжках и статьях как о чём-то твёрдо установленном. В настоящее время считается, что найдено даже место падения метеорита – полуостров Юкатан (Мексиканский залив), см. рис. 1. Кратер, разумеется, за 65 млн лет сильно «зарос». Всё же его нашли! Определили даже диаметр кратера; он оказался совсем не маленький – примерно 180 км. Это значительно больше знаменитого Аризонского кратера (рис. 2), снимки которого вы, наверняка, видели в книгах; диаметр последнего «всего» 1,2 км.

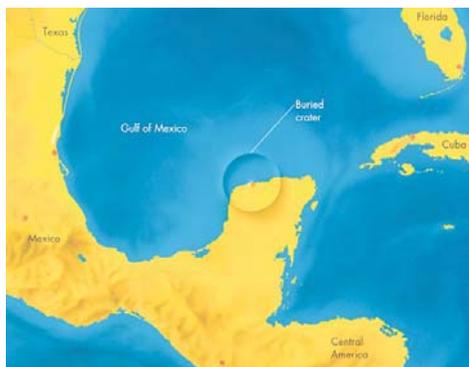


Рис. 1

Чем же оказалась так привлекательна гипотеза удара из космоса в проблеме исчезновения динозавров? Важны детали, к которым мы и переходим.

В 1979 г. группа палеонтологов (сотрудников Калифорнийского университета в Беркли (США)) опубликовала сообщение об открытии в Апеннинах (Италия) слоя глины толщиной (см. рис. 3) $\delta = 1 - 2$ см с необычайно большим содержанием тяжёлого элемента **иридия** (${}_{77}\text{Ir}$).

Этот слой отделял известняки старше чем 65 млн лет от покрывающих их более молодых известняков. (Монета 25 центов положена авторами статьи [1] для масштаба). Оказалось, что **ниже этого «иридиевого» слоя останки динозавров находят в большом количестве, выше — их практически нет.**

Позже аналогичные открытия были сделаны в Дании, Испании, Новой Зеландии и в других районах Земли.

Содержание иридия в найденном слое оказалось примерно раз в 30 больше, чем в прилегающих слоях (выше и ниже).

Почему привлёк к себе внимание именно иридий?

Дело в том, что **содержание иридия в земной коре ничтожно мало**



Рис. 2

($10^{-6}\%$ по массе). Он относится к наименее распространённым элементам; встречается гораздо реже золота и платины. Ежегодное производство иридия на Земле (во всех странах мира вместе взятых) составляет всего около 3 тонн, что с учётом плотности иридия (примерно $22,6 \text{ т/м}^3$) составляет порядка $0,1 \text{ м}^3$.



Рис. 3

Зато иридий часто встречается в метеоритах! В связи с этим и возникла идея Космического удара.

В состав группы сотрудников Калифорнийского университета входили физик Л. Альварес, лауреат Нобелевской премии по физике 1968 г. за открытие так называемых резонансных частиц, и его сын, геолог У. Альварес.

Были проведены численные оценки того, как произошло то, что произошло; они и убедили общественность.

Оценка энергии Юкатанского метеорита

Мы можем сделать лишь оценку по порядку величины, поскольку слишком мало знаем об обстоятельствах столкновения. Мы не знаем, откуда летел метеорит, а потому (и это – главное), какое влияние на его движение оказало Солнце. Будем считать, что метеорит врезался в Землю, имея скорость, равную 2-й космической скорости для Земли:

$$v = v_2 = \sqrt{2G \frac{M_{\text{Земли}}}{R_{\text{Земли}}}} = \sqrt{2gR_{\text{Земли}}} \approx 11,2 \text{ км/с}, \quad (1)$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – гравитационная постоянная, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли, $M_{\text{Земли}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ – масса Земли, $R_{\text{Земли}} = 6400 \text{ км}$ – радиус Земли. Приводим формулу (1) без вывода. Напомним лишь, что 2-й космической скоростью называют такую **минимальную** скорость, которую необходимо сообщить космическому аппарату (КА) на поверхности Земли, чтобы он мог **покинуть** Землю, т. е. удалиться на сколь угодно большое расстояние от её поверхности. При этом на бесконечности КА **остановится**; последнее есть следствие требования **минимальности** скорости, которую необходимо сообщить.

Мысленно **обратим задачу**. Если где-то вдали от Земли (на бесконечности) КА (или метеорит – всё равно!) покоился, а затем под действием силы притяжения Земли стал приближаться к Земле, постепенно разго-

Далее мы проведём самостоятельные оценки (разумеется, более упрощённые, чем у Альваресов).

няясь, то подлетит к поверхности Земли он как раз со 2-й космической скоростью. Если бы на бесконечности он имел уже некоторую скорость, направленную в сторону Земли, то в Землю он врезался бы с большей скоростью, чем v_2 . Если же на бесконечности его скорость была направлена в сторону от Земли, то он бы вовсе не долетел до Земли; разумеется, если его бы не принудили к этому силы притяжения со стороны других космических тел.

Перед столкновением с Землёй метеорит обладал кинетической энергией:

$$E = mv_2^2 / 2. \quad (2)$$

Массу метеорита можно определить по формуле:

$$m = \rho V = \rho(4\pi/3)(d/2)^3, \quad (3)$$

где d – диаметр метеорита. Его можно оценить, зная толщину иридиевого слоя, 1–2 см; оценка даёт значение d порядка 10 км.

Какую плотность положить в формуле (3)? Если метеорит состоял в основном из железа, то ясно – примерно 8 т/м^3 . Если его химический состав был близок к тому, который имеет Земная кора (наружные примерно 30 км), то $2,5 \text{ т/м}^3$. Средняя по всему объёму плотность Земли равна $5,5 \text{ т/м}^3$. Порядки всех трёх плотностей одинаковы. Положим для оценки $\rho = 5500 \text{ кг/м}^3$; тогда для массы Юкатанского метеорита имеем **оценку**:

$$m \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ кг}. \quad (4)$$

Отсюда получаем оценку кинетической энергии Юкатанского метеорита перед его ударом о Землю:

$$E_{\text{Юкатанского метеорита}} \approx 2 \cdot 10^{23} \text{ Дж.} \quad (5)$$

Размер метеорита (10 км) кажется маленьким (это примерно 1/3 диаметра Москвы – точка на глобусе!). Всё же Юкатанский метеорит вряд ли назовёшь крошечным: масса всей атмосферы Земли (примерно равна $5,3 \cdot 10^{18}$ кг) лишь в 1500 раз больше массы метеорита. Правда, масса всей Земли (примерно $6 \cdot 10^{24}$ кг) больше массы Юкатанского метеорита уже в 2 миллиарда раз.

Сосредоточим теперь своё внимание на энергии метеорита. Чтобы понять, насколько велика эта энергия, её нужно сравнить с какой-нибудь другой энергией. Например, энергия, выделившаяся при взрыве американской бомбы в Хиросиме, была порядка:

$$E_{\text{бомбы Хиросимы}} \approx 10^{14} \text{ Дж,} \quad (6)$$

$$N = \frac{E_{\text{Юкатанского метеорита}}}{E_{\text{бомбы Хиросимы}}} \approx 2 \cdot 10^9, \quad (7)$$

т. е. энергия Юкатанского метеорита была **в 2 миллиарда раз больше!**

Посмотрите на глобус. Город Хиросима – это «точка» на нём. Но представьте себе **2 миллиарда таких «точек» на глобусе и 2 миллиарда бомб Хиросимы!!!** Ясно, что это – очень много!!!

Задача. Если в результате падения Юкатанского метеорита на всю Землю пришла энергия порядка энергии 2 миллиардов бомб Хиросимы, то энергия «скольких атомных бомб» придёт к городу размером примерно с Москву?

Решение. Сравним площади Москвы и всей Земли. Считая Москву кругом с диаметром порядка $d_{\text{Москвы}} \approx 30$ км, по формуле площади круга $S = \frac{\pi}{4} d^2$ получаем $S_{\text{Москвы}} \approx 7 \cdot 10^8 \text{ м}^2$.

Площадь поверхности Земли найдём по формуле площади шара $S = 4\pi R^2$,

положив $R \approx 6400$ км; в результате $S_{\text{Земли}} \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$. Площадь Москвы составляет примерно одну миллионную долю площади всей Земли. Поэтому на город площадью с Москву придёт энергия порядка:

$$n = \frac{S_{\text{Москвы}}}{S_{\text{Земли}}} \cdot N \approx$$

$$\approx 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^9 \approx 3000$$

бомб Хиросимы! Вот так!

Понятно, что разрушительный эффект от падения Юкатанского метеорита был катастрофичен для биосферы. Скорее всего, ударная волна от его падения уничтожила все леса на Земле и всех крупных наземных животных. По оценкам У. Альвареса удар метеорита о Землю поднял в атмосферу огромную массу пылевых частиц, которые на многие годы сделали атмосферу непрозрачной, уменьшив фотосинтез. Это и привело к исчезновению огромного числа видов животных.

Всё же тараканы и в этом случае не были уничтожены! И мелкие млекопитающие, типа мышек, только зарождавшие в ту эпоху, тоже выжили!

Однако вернёмся к энергии Юкатанского метеорита (5). С чем её ещё можно сравнить? С энергией Челябинского метеорита (2013 г.) нет смысла: масса последнего (и как следствие – кинетическая энергия) были несравненно меньше (масса Челябинского метеорита была не больше чем 10^4 тонн; сравните с массой (4)).

Значительно больше была энергия при ударе Тунгусского «метеорита» (1908 г.) – порядка $2 \cdot 10^{17}$ Дж. Но и она была в миллион раз меньше энергии Юкатанского метеорита. Соответственно, разрушительный эффект от Тунгусского «метеорита» не имел планетарного масштаба.

Стоит ли опасаться падения на Землю больших метеоритов

Уточним: падения **космических тел** порядка Юкатанского. Про Тунгусский «метеорит» до сих пор нет согласия, что это было такое. Оказывается, ещё как стоит опасаться таких столкновений!

В июле 1994 г. астрономы наблюдали (впервые!) столкновение кометы, названной впоследствии кометой Шумейкер – Леви-9 по фамилиям открывших её астрономов, с планетой Юпитер (см. рис. 4).

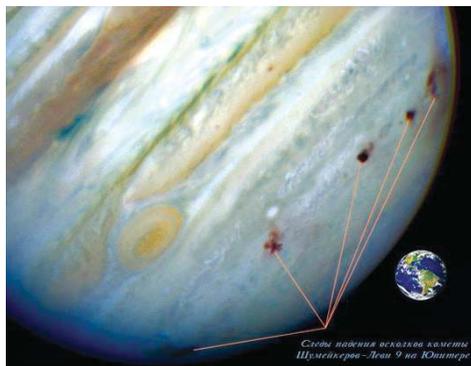


Рис. 4. Следы от осколков кометы Шумейкер – Леви-9 на Юпитере. Для масштаба рядом изображена Земля

Попробуйте самостоятельно решить задачу.

Задача. В июле 1994 г. комета Шумейкер – Леви-9 столкнулась с Юпитером. Ещё до столкновения ядро кометы разделилось на 20 фрагментов. Оцените суммарную кинетическую энергию всех фрагментов перед столкновением, если известно, что каждый фрагмент представлял собой сферу из льда диаметром 1 км. 2-ю космическую скорость для Юпитера для оценки принять равной 60 км/с, плотность льда – 900 кг/м³. Сравните эту энергию с энергией 1-й атомной бомбы (порядка 10¹⁴ Дж).

Ответ. $E \approx 2 \cdot 10^{22}$ Дж; $N \approx 200$ млн бомб Хиросимы.

Вернёмся ещё раз к энергии

$$E_{\text{Юкатанского метеорита}} \approx 2 \cdot 10^{23} \text{ Дж. (5)}$$

Оказывается, на Земле с энергиями всего в 10 раз меньше мы имеем дело ... каждый день. Известно, что энергию на Земле мы получаем прежде всего от Солнца. **Солнечной постоянной** I_C называют количество энергии, поступающей от него на 1 м² земной поверхности перпендикулярно ей за 1 с (без учёта отражения от атмосферы и поглощения в ней) в форме электромагнитного излучения всех длин волн. Она приблизительно равна $I_C \approx 1,4$ кВт/м². Суммарную энергию, приходящую на всю Землю за 1 секунду, оценим по формуле $\dot{E} = I_C \cdot 4\pi R_3^2 \approx 1,8 \cdot 10^{17}$ Дж/с. Тогда суточный «приход» энергии от Солнца на Землю составит $E_{\text{сут}} \approx 1,6 \cdot 10^{22}$ Дж. Видим, что энергия Юкатанского метеорита более чем в 10 раз превосходит это значение.

Кстати, и сама энергия Юкатанского метеорита могла быть больше, чем $2 \cdot 10^{23}$ Дж. Её мы оценивали по формуле

$$E = mv_2^2/2, \text{ где}$$

$$v_2 = \sqrt{2G \frac{M_{\text{Земли}}}{R_{\text{Земли}}}} = 11,2 \text{ км/с} -$$

2-я космическая скорость для Земли. Так было бы, если бы метеорит, двигаясь из далёких областей космоса, разогнался полем тяготения Земли. А если учесть разгон метеорита гравитационным полем Солнца? Тогда, приблизившись (из бесконечности) к Солнцу на такое же расстояние, на каком находится от него Земля (150 млн км),

метеорит имел бы скорость:

$$v'_2 = \sqrt{2G \frac{M_{\text{Солнца}}}{R_{\text{Земля-Солнце}}} \approx 42 \text{ км/с}}$$

($M_{\text{Солнца}} = 2 \cdot 10^{30}$ кг – масса Солнца), а это, грубо говоря, в 4 раза больше 2-й космической скорости Земли. Кинетическая энергия метеорита, которая пропорциональна квадрату скорости, была бы в 16 раз больше значения $2 \cdot 10^{23}$ Дж, т. е. имела порядок 10^{24} Дж. Кстати, в статье [1] приводится значение энергии Юкатанского ме-

теорита порядка $5 \cdot 10^{23}$ Дж. Впрочем, о том, что он упал именно вблизи полуострова Юкатан, в статье ещё не говорилось (кратер нашли позже).

В заключение скажем ещё, что энергия Юкатанского метеорита, хотя выделилась первоначально на сравнительно малой площади, но очень быстро распространилась по всей поверхности Земли. Последствия мы все знаем: «живых» динозавров видим лишь в кино, а их скелеты – в палеонтологическом музее.

Литература

1. Дейл А. Рассел, «Массовые вымирания позднего мезозоя» // В мире науки (Scientific American – издание на русском языке), 1983, №1, с. 48.

Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор

Вот раньше были грозы!

Теперь грозы не те, что радовали (или пугали) 20 лет назад. Тогда после блеска молний звучали величавые раскаты грома. А сейчас что мы слышим? Вой автомобильной сигнализации да вопли тех, у кого перестал работать Интернет.

Удивил кондиционер

– Перенести сильную жару было очень тяжело, – рассказывает человек товарищу.

– И я не выдержал, поддался уговорам и установил дома кондиционер. К моему удивлению, он помог. Прошёл дождь и стало прохладно!

Оба правы

– Если бы ты собиралась быстрее, мы бы не опоздали на поезд!

– А если бы ты не торопил меня, нам не пришлось бы так долго ждать следующий!

Решение проблемы

– Как уменьшить поток посетителей администрации города?

– Установить на двери в её здании более тугую пружину.

Главное последствие

– Есть ли у вашего шефа какие-либо последствия лазерной коррекции зрения?

– А как же! Мы теперь убираемся в его кабинете в два раза чаще.