Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. Варламов, Визитер — 100 лет назад, *Квант*, 2018, номер 9, 2–8

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20180901>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.95.254.165

26 апреля 2023 г., 03:12:09

Визитер — 110 лет назад

С.ВАРЛАМОВ

В ИСТОРИИ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ БЫЛО много катастрофических для населявших ее существ событий. Некоторые из них оставили неизгладимые следы на поверхности Земли, другие никаких следов не оставили. Несколько крупных следов можно обнаружить, только посмотрев на Землю с космической орбиты, настолько велики их масштабы. Изредка происходят события, когда большой катастрофы Земле удастся избежать, а оставленные следы не позволяют узнать, что за причина привела к их появлению. Например, до сих пор ведутся споры по поводу того, что представлял собой Тунгусский метеорит, который «прошелся» над землей 110 лет назад, а именно 30 июня 1908 года. Не будем перечислять и рассматривать все версии, выдвигавшиеся для объяснения того, что произошло в тот день.

Давайте предположим, что это был визитер, который «прошил» атмосферу Земли и, не ударившись о поверхность, улетел обратно в Космос. Поскольку никаких

частичек вещества метеорита не было обнаружено, будем считать, что он был сплошным железным и (для упрощения расчетов) имел форму куба, который в полете не вращался. Оценим минимальный размер такого гипотетического железного метеорита.

Положим, что до пролета над Землей метеорит принадлежал Солнечной системе (после пролета тоже принадлежал ей и, по-видимому, принадлежит до сих пор). Какая энергия выделилась в воздухе во время такого визита (попробуем выразить ее в тротиловом эквиваленте)? Насколько поднималась температура воздуха перед метеоритом? Почему очевидцы (те, кто видел и слышал, что тогда происходило) утверждали, что было два сильных взрыва, и как это можно объяснить? Вопросов про такую гипотезу можно придумать много, но давайте пока ограничимся уже сформулированными.

Скорость такого визитера на выходе из атмосферы Земли должна быть больше второй космической скорости $v_2 \text{ от Земли} = \sqrt{2gR_{\text{Земли}}} = 11 \text{ км/с}$. А вот какую максимальную относительную скорость могли иметь метеорит и Земля до встречи, когда находились далеко друг от друга? Земля вращается по почти круговой орбите радиусом около 150 млн км вокруг Солнца, делая один оборот за год. Это соответствует скорости, равной по величине примерно 30 км/с. Если же скорость мгновенно, «по волшебству», увеличится в $\sqrt{2}$ раз, то Земля получит вторую космическую скорость и навсегда

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20180901>

ФАКТ НА АИФ.RU

НА 1970 ГОД УЧЁНЫЕ ЗАФИКСИРОВАЛИ 77 РАЗЛИЧНЫХ ТЕОРИЙ О ПРИРОДЕ «ТУНГУССКОГО ФЕНОМЕНА»

улетит от Солнца по траектории, имеющей форму параболы. Так как мы предположили, что метеорит до встречи с Землей принадлежал Солнечной системе, то это означает, что скорость метеорита на том же расстоянии от Солнца, на котором находится Земля, не могла быть больше этой второй космической скорости, т.е. больше $v_2 \text{ от Солнца} = \sqrt{2} \cdot 30 \text{ км/с} \approx 42,4 \text{ км/с}$. Следовательно, максимальная относительная скорость планеты и космического тела, когда они находились на большом расстоянии друг от друга, была не больше $72,4 \text{ км/с}$. За счет притяжения к Земле до входа в ее атмосферу метеорит приобретет дополнительную скорость, и на входе в атмосферу его максимальная скорость может быть равной $v_0 = \sqrt{11^2 + 72,4^2} \text{ км/с} \approx 73 \text{ км/с}$. Понятно, что это оценка по максимуму, а на самом деле (и скорее всего) скорость метеорита была раза в два меньше.

Механика движения симметричного твердого тела (не самолета или вертолета) весьма проста. При полете в воздухе, который до взаимодействия можно считать покоившимся, метеорит сообщает воздуху скорость порядка своей собственной. Сжимаемый перед метеоритом воздух разогревается, светится, и на это тратится кинетическая энергия метеорита. Масса воздуха, «заметенная» поперечным сечением метеорита, пропорциональна эффективной длине полета в атмосфере, которую для первоначальной грубой оценки размеров метеорита можно считать одинаково плотной на всех высотах. Предположим, что траектория полета метеорита в атмосфере мало отличается от прямой линии. Силой притяжения Земли, действующей во время полета метеорита в атмосфере в направлении, перпендикулярном скорости, сначала пренебрежем, а затем оценим вызванное ею изменение скорости.

Модель атмосферы с одинаковой по всей своей высоте плотностью $\rho_{\text{возд}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ дает высоту атмосферы $h = 8 \text{ км}$ ($h = p_{\text{атм}} / (g \rho_{\text{возд}})$). А длина траектории метеорита, слегка коснувшегося поверхности Земли, в такой атмосфере состав-

ляет

$$L = 2\sqrt{(R_{\text{Земли}} + h)^2 - R_{\text{Земли}}^2} \approx \sqrt{8R_{\text{Земли}}h} = \sqrt{\frac{8R_{\text{Земли}}p_{\text{атм}}}{g\rho_{\text{возд}}}} = \sqrt{\frac{8R_{\text{Земли}}RT}{gM}} \approx 640 \text{ км}.$$

Здесь R – универсальная газовая постоянная, T – средняя температура воздуха вблизи поверхности Земли, M – это средняя молярная масса воздуха. Давление на поверхности и плотность воздуха вблизи поверхности пропорциональны друг другу, поэтому эффективная длина определяется размером Земли и отношением RT/M .

Упрощенное уравнение движения метеорита с учетом сопротивления воздуха, который приобретает такую же скорость, какую до взаимодействия с воздухом имел метеорит, можно записать в виде

$$mdv = -vdt \cdot Spv, \text{ или } \frac{dv}{v} = -\frac{dm}{m}.$$

Здесь dm – это масса воздуха, вовлеченного в движение метеоритом за короткое время dt . Решение этого уравнения таково, что скорость убывает с ростом массы воздуха, которую метеорит вовлек в движение, по экспоненциальному закону. Это означает, что отношение скорости v_0 на входе в атмосферу к скорости v_1 в момент, когда метеорит почти коснулся поверхности Земли, равно отношению скорости v_1 ко второй космической скорости (нужной для покидания навсегда Земли), т.е. к $v_2 = 11 \text{ км/с}$. Оценка сверху дает такую величину скорости v_1 :

$$v_1 = \sqrt{v_0 v_2} \approx 28 \text{ км/с}.$$

Следовательно, время пребывания метеорита в плотной атмосфере равно по порядку величины 30–40 секундам. За такое время изменение скорости метеорита в направлении к центру Земли, связанное с притяжением Земли, составит всего 300–400 м/с. Как видно, эта величина значительно меньше даже второй космической скорости, не говоря уже о скорости визитера при входе в атмосферу.

Считая метеорит сплошным железным с плотностью $\rho_{\text{железа}} = 7800 \text{ кг/м}^3$, оценим

размер A ребра железного куба:

$$\ln \frac{v_0}{v_2} = \frac{LA^2 \rho_{\text{возд}}}{A^3 \rho_{\text{железа}}}, \text{ и } A = 52 \text{ м.}$$

Для вдвое меньшей относительной скорости тел на большом расстоянии до встречи размер ребра куба, согласно оценке, будет больше: $A_1 = 82 \text{ м}$.

Поскольку кинетическая энергия метеорита уменьшилась, то изменение энергии метеорита равно выделившейся в атмосфере Земли энергии:

$$|\Delta E_{\text{кин}}| = A^3 \rho_{\text{железа}} \left(\frac{v_0^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) \approx \approx 2,8 \cdot 10^{18} \text{ Дж.}$$

Для вдвое меньшей относительной скорости наших тел до их встречи выделившаяся энергия будет немного меньше: $|\Delta E_{1\text{кин}}| \approx 2,6 \cdot 10^{18} \text{ Дж}$.

Если время пролета метеорита через атмосферу порядка 40 секунд, то средняя за время пролета мощность, выделившаяся в воздухе, была $7 \cdot 10^{16} \text{ Вт}$. При этом мощность менялась со временем, так как изменялись и скорость метеорита и плотность воздуха, сквозь который он летел. Поскольку при взрыве 1 килограмма тротила (тринитротолуола) выделяется 4,5 МДж энергии, то выделившаяся метеоритом энергия эквивалентна взрыву 620 мегатонн тротила. Эта величина в 10 раз больше энергии, выделившейся при взрыве над Новой Землей 30 октября 1961 года термоядерной супербомбы, которая приобрела неофициальное название «Кузькина мать». При ее взрыве выделилась энергия, эквивалентная взрыву 58,6 мегатонн тротила.

Земле во время встречи с Тунгусским метеоритом, в соответствии с рассматриваемой версией события, повезло в том отношении, что метеорит пролетел через атмосферу на минимальной высоте примерно 8–10 км, т.е. он не касался поверхности Земли. На такой высоте среднее давление атмосферы примерно в четыре раза меньше давления вблизи поверхности. Поэтому для такого пролета минимальный размер метеорита может быть во столько же

раз меньше, а именно $A/4 = 13 \text{ м}$. И выделившаяся энергия тоже меньше: она эквивалентна энергии взрыва 10 мегатонн тротила. Эта величина в 6 раз меньше энергии, выделившейся при взрыве «Кузькиной матери». Средняя мощность, выделившаяся в воздухе во время такого пролета, равна примерно 10^{15} Вт .

Для более точной оценки массы метеорита, касающегося поверхности Земли, примем, что атмосфера не одинаково плотная, а «изотермическая». Эта модель атмосферы, конечно же, ближе к истине, чем модель атмосферы с одинаковой плотностью воздуха на всех высотах. Высота h метеорита над поверхностью выражается через расстояние x от точки касания поверхности формулой $h = x^2 / (2R_{\text{Земли}})$. В «изотермической» атмосфере плотность воздуха с высотой меняется по закону $\rho_h = \rho_0 \cdot \exp(-Mgh/(RT))$. Тогда масса воздуха, вовлеченного в движение метеоритом, будет равна

$$m = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_0 A^2 dx \cdot \exp\left(-\frac{Mgx^2}{2R_{\text{Земли}}RT}\right) = \rho_0 A^2 \sqrt{\frac{2R_{\text{Земли}}RT}{Mg}}.$$

Расчеты показывают, что в этом случае эффективная длина траектории метеорита в атмосфере будет меньше, а именно

$$L \approx 335 \text{ км.}$$

В итоге формула для нахождения минимальных размеров метеорита, почти коснувшегося поверхности Земли, приобретает вид

$$A = \frac{\rho_{0\text{возд}}}{\rho_{\text{железа}}} \frac{1}{\ln\left(\frac{v_0}{v_2}\right)} \sqrt{\frac{2R_{\text{Земли}}RT}{Mg}} \approx 27 \text{ м.}$$

А с учетом того, что Тунгусский метеорит пролетел над поверхностью на минимальной высоте порядка 10 км, размер метеорита (оценка) будет еще меньше: $\approx 7 \text{ м}$.

Грубая оценка в 13 м и более точная оценка в 7 м для размеров Тунгусского метеорита – это все-таки величины одного порядка (порядка 10 метров).

Одним из самых известных свидетельств очевидцев Тунгусского метеорита является сообщение Семена Семенова, жителя поселка Ванавара, находившегося в 70 км на юго-востоке от эпицентра взрыва:

«... Вдруг на севере небо раздвоилось, и в нем широко и высоко над лесом появился огонь, который охватил всю северную часть неба. В этот момент мне стало так горячо, словно на мне загорелась рубашка. Я хотел разорвать и сбросить с себя рубашку, но небо захлопнулось и раздался сильный удар. Меня сбросило с крыльца сажени на три. После удара пошел такой стук, словно с неба падали камни или стреляли из пушек, земля дрожала, и когда я лежал на земле, то прижимал голову, опасаясь, чтобы камни не проломили голову. В тот момент, когда раскрылось небо, с севера пронесся горячий ветер, как из пушки, который оставил на земле следы в виде дорожек. Потом оказалось, что многие стекла в окнах выбиты, а у амбара переломило железную закладку для замка двери» («Знание—сила», 2003, №6).

Желательно дать объяснение наблюдавшимся явлениям.

Понятно, что метеорит, «сгребая» перед собой воздух, заставляет его сжаться и разогреться. В результате молекулы воздуха диссоциируют на атомы, а затем атомы ионизируются. Возникшая горячая плазма светит во все стороны. Для оценки температуры плазмы, в которую метеорит превратил воздух перед собой, нужно учесть, что воздух в основном состоит из двухатомных молекул азота. Сначала мы предположим, что потеря на излучение нет и вся потерянная метеоритом энергия идет на разогрев и ионизацию воздуха. Это позволит оценить максимальную (теоретически) температуру возникшей плазмы.

В системе отсчета, связанной с метеоритом, воздух движется со скоростью v , которая во много раз больше тепловых скоростей движения молекул в воздухе (~ 500 м/с), и тормозится до упорядоченной скорости, равной нулю. При этом вся кинетическая энергия порции воздуха $dmv^2/2$ преобразуется в его тепловую энер-

гию. Сжатый и разогревшийся воздух расходуется от метеорита в стороны со скоростью, которая во много раз меньше скорости метеорита (она будет определяться температурой, до которой воздух нагрелся). А навстречу метеориту на смену ушедшим поступают новые порции воздуха.

Если рассматривать движение в системе отсчета, в которой атмосфера покоится, то нагретый воздух со своей внутренней энергией $dmv^2/2$ будет иметь еще и такую же по величине энергию упорядоченного движения. Таким образом, кинетическая энергия метеорита при «обслуживании» небольшой массы воздуха dm уменьшится на величину dmv^2 . Максимальное давление перед метеоритом будет вблизи поверхности Земли, и его оценка — это произведение плотности воздуха на квадрат скорости метеорита в этом месте. Для рассмотренного случая эта величина примерно равна 10^9 Па, что соответствует пределу прочности железа, т.е. метеорит не развалится на части, а останется сплошным куском железа.

Энергия одной молекулы азота, движущейся со скоростью 73 км/с (в системе отсчета метеорита), равна 746 эВ; энергия диссоциации одной молекулы азота — 9,8 эВ; энергия однократной ионизации атома азота — 14,5 эВ. Для отрыва электрона от однократно ионизованного атома азота требуется 29,6 эВ; для отрыва электрона от дважды ионизованного атома азота нужно 47,5 эВ. После диссоциации молекулы и трех актов ионизации атомов азота из одной молекулы азота получается 8 частиц: 2 иона азота и 6 электронов. На одну образовавшуюся частицу (на один ион или один электрон) после перечисленных актов ионизации остается в среднем энергия 71 эВ. А для того чтобы оторвать еще и четвертый электрон от трехкратно ионизованного атома азота требуется уже энергия 77,5 эВ, т.е. на третьем электроны ионизация атомов прекратится. В результате максимально возможная (теоретически) температура образовавшейся плазмы, в которой все частицы имеют энергию $3kT/2$, связанную с поступательным движением, равна примерно $540 \cdot 10^3$ К (это

на входе метеорита в атмосферу). В самой ближней к поверхности Земли точке траектории метеорита, когда каждая молекула азота имеет перед встречей с метеоритом (в системе отсчета метеорита) энергию в несколько раз меньшую: ~ 110 эВ, воздух перед метеоритом тоже превратится в плазму, хотя процесс ионизации остановится на числе 1, а на каждую образовавшуюся частицу (два иона и два электрона) останется энергия примерно в 18 эВ. Это соответствует теоретическому максимуму температуры порядка $140 \cdot 10^3$ К. И даже на выходе метеорита из атмосферы энергия молекул азота в системе отсчета метеорита равна приблизительно 16 эВ, что после диссоциации молекул на атомы соответствует максимальной (теоретически) температуре порядка $20 \cdot 10^3$ К.

Это, естественно, сильно завышенные оценки, так как в приведенном расчете предполагалось, что вся энергия пошла на ионизацию и нагрев вещества. На самом деле энергия будет очень быстро «высвечиваться» в окружающее пространство в виде излучения. А так как воздух прозрачен, в излучение будет переходить энергия вещества вплоть до того момента, когда вещество охладится до температуры порядка 10^4 К. При отличии теоретического максимума температуры от этого значения во много раз можно считать, что минимум половина потерянной метеоритом энергии на первом этапе переходит в излучение. А уже затем излучение, поглощенное предметами на земле, превращается в энергию звуковых ударных волн и через некоторое время переходит в тепловую энергию.

Будем для грубой оценки считать, что в любом месте траектории метеорита практически вся кинетическая энергия, потерянная им, сначала превращается в излучение. Для получения оценочной зависимости мощности излучения от расстояния x по горизонтали от точки, в которой расстояние между метеоритом и поверхностью Земли самое маленькое, придется учитывать зависимость плотности воздуха от высоты. Рассмотрим ситуацию, когда кубический метеорит из железа с размером ребра куба $A = 11$ м влетает в атмосферу со

скоростью 73 км/с, «прошивает» ее, приблизившись к поверхности Земли на минимальное расстояние 10 км, и вылетает из атмосферы, имея скорость 12,56 км/с, немного превышающую вторую космическую скорость относительно Земли. Тогда

$$\ln \frac{v_0}{v_x} = \frac{\rho_{\text{возд. на высоте 10 км}}}{A \rho_{\text{железа}}} \times \int_{-\infty}^{+\infty} dx \cdot \exp \left(-\frac{Mgx^2}{2R_{\text{Земли}}RT} \right) = 18,9 \int_{-\infty}^{+\infty} dy \cdot \exp(-507,6y^2),$$

где $y = \frac{x}{R_{\text{Земли}}}$.

Мощность потерь энергии метеоритом (примерно равная мощности излучения) зависит от этого расстояния x следующим образом:

$$W_x = A^2 v_x^3 \rho_{\text{возд. на высоте 10 км}} \cdot \exp(-507,6y^2).$$

Для получения этой зависимости придется воспользоваться численными методами (т.е. компьютером). Поскольку при полете самолета на высоте 10 км обычно командир корабля сообщает пассажирам, что температура за бортом минус 50 градусов (по Цельсию), то в формулу для коэффициента при y^2 в выражении для экспоненты была подставлена температура $T = 220$ К. Соответствующий коэффициент при переменной y равен $-507,6$.

Согласно проведенным расчетам, скорость метеорита уменьшилась всего на 0,1% по сравнению с v_0 на расстоянии примерно $0,1R_{\text{Земли}}$ от точки максимального сближения с поверхностью. Чтобы уменьшить объем вычислений, начнем расчеты с момента, когда это расстояние составляет $0,2R_{\text{Земли}}$, и закончим в тот момент, когда это расстояние будет таким же, но метеорит будет находиться с противоположной стороны от точки максимального сближения. На приведенном здесь графике представлена вычисленная зависимость v_t/v_0 метеорита от времени (красный цвет) и зависимость мощности потерь

кинетической энергии метеоритом (в относительных единицах) от времени (синий цвет). На преодоление этого участка траектории длиной $0,4R_{\text{Земли}} \approx 2560$ км метеориту потребовалось всего 113 с. При этом заметные потери энергии происходят в течение всего 15 с. Моменту времени 20 с на графике соответствует минимальное расстояние от метеорита до поверхности Земли (10 км). Максимум мощности потерь достигается при расстоянии метеорита по горизонтали от точки наибольшего сближения с поверхностью Земли, равном 225 км. Более 90% от максимальной мощности достигается в диапазоне расстояний от 287 до 164 км, здесь скорость метеорита падает от 87 до 69,5% от v_0 . Этот участок пути длиной приблизительно 120 км метеорит проходит всего за 2,2 с. При этом максимальная мощность потерь энергии равна

$$0,266A^2v_{\text{хр}}^3 \rho_{\text{возд. на высоте 10 км}} = 3,7 \cdot 10^{15} \text{ Вт.}$$

Поскольку для Тунгусского метеорита «площадь поражения» на поверхности Земли составила около 2000 км^2 , то это означает, что поперечные размеры этого участка равны примерно 40×50 км. Повидимому, максимальные разрушения на поверхности Земли произошли под небольшим участком траектории метеорита, где мощность потерь была максимальной. Там выделилась максимальная доля потерянной метеоритом кинетической энергии, там и возникли пожары, и был повален лес.

Обозначим через h высоту метеорита над поверхностью Земли. Если разделить мощность потерь на $4\pi h^2$, то получится мощность, приходящаяся на единицу площади

поверхности в точке непосредственно под метеоритом. Например, в тот момент, когда мощность потерь самая большая, высота h равна примерно 14 км. А соответствующая мощность на единицу площади составляет $1,5 \text{ МВт/м}^2$. Эта величина в тысячу больше мощности солнечного излучения $1,37 \text{ кВт/м}^2$, падающего на площадку размером 1 м^2 , расположенную перпендикулярно солнечным лучам вне атмосферы Земли. Недаром одна из книг, посвященная истории создания ядерного оружия, названа автором «Ярче тысячи Солнц».

Вот почему под теми участками траектории метеорита, где выделялась заметная доля максимальной мощности, возникли сплошные пожары. Ведь за несколько секунд облучения вещество поверхности (листья и хвоя деревьев тайги — летом все зеленое) разогреются до температуры возгорания. Излучение было настолько интенсивным, что обычно голубое дневное небо стало огненным. Плазма, в которую превратился воздух, излучает не только в

видимом диапазоне длин волн, но и в ультрафиолете. Это приводит к тому, что свет может многократно «перехватываться» молекулами и атомами воздуха и вновь излучаться. А у азота и у кислорода есть линии поглощения и излучения, находящиеся в видимом диапазоне длин волн. Поэтому все небо, которое видели наблюдатели во время Тунгусского события, было огненным.

Поскольку воздух возле сильно прогретой поверхности быстро нагревается, то это сопровождается ростом давления, причем давление растет еще и потому, что испаряющееся вещество участков поверхности увеличивает концентрацию частиц, создающих давление. Это происходит практически одновременно с ярким освещением поверхности, поэтому возникает резкое повышение давления. Таким образом, первый удар грома связан с излучением, которое распространяется со скоростью света. Нагрев зависит от угла падения лучей на поверхность, поэтому давление падало в направлении от места, где яркость освещения была максимальной. Это вызвало ветер – воздух «разбежался» от очага нагрева. А когда к участку поверхности, на котором находился очевидец, приходили ударные волны от тех участков воздуха, через которые пролетел метеорит, то человек слышал второй удар грома. Вот почему наблюдатели-очевидцы говорили, что одежда на них так сильно разогревалась, что обжигала кожу, и что было два разнесенных по времени взрыва. Для каждого наблюдателя, где бы он ни находился, второй удар воспринимается как взрыв, потому что скорость метеорита значительно больше скорости распространения звуковых волн (даже ударных) в воздухе. С минимальной задержкой по времени к наблюдателю приходит звуковая волна от самого ближнего к нему места траектории метеорита, а затем приходят звуки от более далеких участков траектории полета. При минимальном расстоянии 10 км задержка составит примерно 20–30 с, а во всех остальных случаях она будет больше.

Каждый наблюдательный человек во время грозы с ударами молний испытывает те же самые ощущения, когда к нему приходят звуковые волны от разных участков в воздухе, через которые прошла молния. Если молния ударила далеко от места наблюдателя, то ему слышны продолжительные раскаты грома, приходящие с задержкой после яркой световой вспышки. А вот если молния ударила в расположенный рядом с наблюдателем столб или дерево, то звуковой удар получается резким и очень громким. И звуки, приходящие после первого удара, уже воспринимаются как слабые, т.е. никаких продолжительных «раскатов грома» не возникает.

Как и во время испытаний ядерного оружия, в частности «супербомбы» над Новой Землей, при пролете метеорита прогретый воздух вместе с продуктами горения на земле поднялся на высоту более 90 км. Его разнесло ветрами в разные стороны, и в течение нескольких суток наблюдались облака, светящиеся на больших высотах порядка 80 км. «Белые ночи» в северном полушарии после пролета Тунгусского метеорита были не только в своих традиционных местах (на широтах больше 60°), но и значительно южнее.

В заключение нужно отметить, что в рассмотренной модели явления тело метеорита считалось симметричным. Но для сравнительно небольшого космического тела это вовсе не обязательное условие. Можно, например, вспомнить свое детское развлечение – бросание плоских камешков на поверхность воды. При удачном броске камешек совершает несколько прыжков по воде. Нечто подобное могло иметь место и в случае Тунгусского метеорита, только «прыжок» при ударе об атмосферу был всего один.