

ПРОБЛЕМНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

имени В. В. КУЙБЫШЕВА

КОМИССИЯ ПО МЕТЕОРИТАМ И КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ СО АН СССР
ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СССР. ТОМСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ. ТРУДЫ, ТОМ 6.
ТОМСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ВСЕСОЮЗНОГО АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО
ОБЩЕСТВА

ПРОБЛЕМА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

ВЫПУСК 2



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Томск — 1967

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ПЫЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ ТУНГУССКОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА

А. В. ЗОЛотов

Несмотря на длительные, в течение нескольких десятков лет, исследования Тунгусского явления, до сих пор в литературе нет единого мнения о структуре и размерах тунгусского космического тела. Одни авторы считают, что это было рыхлое снегообразное тело, другие в своих расчетах принимали космическое тело за монолитную глыбу из льда, камня или железа [1—2]. В настоящее время некоторыми авторами разрабатывается гипотеза о том, что тунгусское космическое тело представляло собой рой частиц, составляющий голову гипотетической кометы, или пылевое облако с плотностью $\rho_T \ll 1 \text{ г/см}^3$ и поперечным сечением в несколько квадратных километров [3—4].

Таким образом, в различных предположениях, в зависимости от мнения того или иного автора, размеры тунгусского космического тела меняются от 10 м, если автор считает, что тело было глыбой [1,5], до нескольких километров, если автор считает, что тело было облаком пыли [4], а плотность тела меняется соответственно от $1\text{—}8 \text{ г/см}^3$ до $0,01\text{—}0,001 \text{ г/см}^3$ и менее, т. е. размеры и плотность тунгусского космического тела меняются на 3—4 порядка величины.

Отсюда мы видим, что оценка, хотя бы по порядку величины, размеров космического тела имеет большое значение для изучения Тунгусского явления.

Не отдавая предпочтения какому-либо из перечисленных мнений, произведем оценку верхнего значения размеров тунгусского космического тела на основании фактических данных.

Одним из основных фактов в районе Тунгусской катастрофы является радиальный вывал леса с практически единым центром (рис. 1) с общей площадью области поваленных деревьев около 2000 км^2 [6] и средним радиусом этой области 25 км. Радиальный характер вывала леса с малыми размерами эллипса рассеяния направлений поваленных деревьев относительно эпицентра ($2 \times 3 \text{ км}$ [4]) (рис. 1) говорит о том, что ударная воздушная волна, которая произвела разрушения в тайге, имела практически единый центр. Наличие стоячего леса, сохранившегося на корню после катастрофы и расположенного внутри области радиально поваленного леса [7], говорит о том, что центр ударной волны находился в воздухе на некоторой высоте от поверхности земли, не менее 5 км [8].

Статистическая обработка карты поваленного леса дает возможность сделать ряд конкретных оценок некоторых параметров ударной волны и космического тела. Например, по размерам области стоячего леса в районе эпицентра взрыва и характеру разброса азимутов поваленных деревьев можно определить высоту взрыва [8, 9], по размерам области поваленного леса можно оценить мощность взрыва [8, 9], по

статистической обработке поля направлений поваленных деревьев можно определить соотношение интенсивности взрывной и баллистической волн, исходя из которого можно определить и размеры космического тела.

Отсюда мы видим, что для определения размеров и возможной структуры тунгусского космического тела очень важным вопросом является вопрос о соотношении интенсивности взрывной и баллистической волн и их роли в повале леса. Для решения этого вопроса в первую очередь необходимо выяснить, какая волна взрывная или баллистическая произвела радиальный вывал леса.

Рассмотрим этот вопрос подробнее.

При оценке параметров взрывных явлений и ударных волн, по-видимому, целесообразно отвлечься от интерпретации и точки зрения различных исследователей на природу Тунгусского явления и механизм взрыва космического тела, поэтому будем рассматривать эти вопросы (оценку параметров) независимо от механизма и причины образования ударных волн.

Для статистической обработки карты разрушений поле направлений поваленных деревьев¹⁾ представим как поле векторов.

Центр поля векторов можно определить методом наименьших квадратов (метод наименьших квадратов достаточно полно изложен в литературе [10] и уже использован для определения координат эпицентра Тунгусского взрыва [11], поэтому повторять его изложение, по-видимому, нецелесообразно).

Центр совокупности векторов при достаточно большом количестве векторов, по-видимому, можно принять за центр разрушений. Однако здесь следует отметить, что при взрыве движущегося тела, вследствие влияния баллистической волны, которое проявляется в искажении строгой радиальности вывала леса, центр совокупности векторов и эпицентр взрыва могут и не совпадать. Действительный эпицентр взрыва в сложном тунгусском случае может оказаться на несколько километров впереди центра разрушений по направлению полета тела.

В данной статье анализ отклонений направлений поваленных деревьев от центра разрушений производится относительно центра совокупности поля векторов, который получен методом наименьших квадратов и имеет координаты

$$\varphi = 60^{\circ}53'11''; \lambda = 101^{\circ}55'11''$$

и относительно оси симметрии области разрушений, которая имеет азимут $294^{\circ} \pm 1^{\circ}$ (рис. 1). Ось симметрии области поваленного леса по-видимому, можно принять за проекцию траектории космического тела над районом разрушений.

При обработке карты поваленного леса примем следующие обозначения:

расстояние от центра совокупности векторов до направления поваленного дерева по перпендикуляру $r = OM$ (рис. 2) будем называть линейным отклонением направления поваленного дерева от центра разрушений;

угол δ между направлением поваленного дерева и направлением от этого дерева на центр разрушений (рис. 2) будем называть угловым отклонением направления данного поваленного дерева от центра разрушений.

Анализ линейных отклонений r направлений поваленных деревьев от центра разрушений показал, что среднее квадратичное отклонение

¹⁾ Автор использует выражение «направление поваленного дерева» вместо «среднее направление повала деревьев на пробной площади» и «дерево» — вместо «совокупность деревьев на пробной площади». Размеры площадей 0,25 га. (Прим. ред.).

по оси симметрии области разрушений равно $\sigma_x = 2,05$ км, а по перпендикулярной оси $\sigma_y = 1,65$ км.

Интересно отметить, что среднее квадратичное линейное отклонение вдоль оси симметрии (проекции траектории космического тела) заметно больше, чем по перпендикулярной оси:

$$2,05 \text{ км} = \sigma_x > \sigma_y = 1,65 \text{ км}. \quad (1)$$

Это обстоятельство дает возможность оценить протяженность взрыва космического тела.

Допустим, что на высоте $H = 5-7$ км над лесным массивом произошел мощный сферический взрыв точечного заряда, который произвел радиальный вывал леса радиусом 25—30 км. Очевидно, что направления поваленных деревьев будут иметь некоторый разброс относительно эпицентра взрыва, который характеризуется средним квадратичным отклонением

$$\sigma_r^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2. \quad (2)$$

Если рельеф окажется однородным, то средние квадратичные отклонения по двум взаимно-перпендикулярным осям σ_x и σ_y будут равны

$$\sigma_x = \sigma_y. \quad (3)$$

Это условие характеризует сферическую симметрию взрыва.

Далее допустим, что на высоте 5—7 км над лесом произошел мощный цилиндрический взрыв линейного заряда длиной $l = 3-5$ км, который произвел в общем радиальный вывал леса на расстоянии до 20—30 км. Однако в этом случае, по-видимому, будет наблюдаться некоторая осевая симметрия эпицентральной части вывала леса.

Среднее квадратичное отклонение направлений поваленных деревьев от эпицентра (эпицентром цилиндрического взрыва будет проекция центра линейного заряда) по координате X , направленной параллельно оси линейного заряда, будет равна:

$$\sigma_x = \frac{l}{2} + \sigma_y, \quad (4)$$

где σ_y — среднее квадратичное отклонение по оси Y , направленной перпендикулярно оси цилиндрического заряда.

Тогда длину цилиндрического заряда можно определить по формуле:

$$l = 2(\sigma_x - \sigma_y). \quad (5)$$

Следует отметить, что значения σ_x и σ_y зависят не только от размеров заряда, но и от высоты и мощности взрыва.

Равенство (5) имеет смысл при условии

$$\sigma_x > \sigma_y, \quad (6)$$

которое для воздушного протяженного взрыва имеет место тогда, когда высота взрыва не превышает нескольких значений (2—3) протяженности взрыва, т. е. в том случае, когда при подходе к поверхности Земли ударная волна протяженного взрыва еще не успеет выравняться в строго сферическую волну (из экспериментальных данных известно, что при цилиндрическом взрыве ударная волна выравнивается в сферическую волну на расстоянии нескольких длин цилиндрического заряда [12]).

Тогда в области разрушений будет наблюдаться некоторое отклонение от строгой цилиндрической симметрии, вследствие чего появится некоторая осевая симметрия, при которой $\sigma_x > \sigma_y$.

Тунгусское космическое тело, по-видимому, взорвалось во время движения, поэтому естественно, что его взрыв имеет некоторую протя-

женность вдоль траектории. Статистический анализ линейных отклонений r (рис. 1) показал, что в тунгусском случае условие (6) выполняется, поэтому имеет место и равенство (5). Из этого равенства следует, что при условии (6) протяженность взрыва не может быть больше удвоенного значения σ . Это условие можно использовать для оценки верхнего значения протяженности взрыва тунгусского космического тела:

$$l_T \leq 2\sigma_x = 4 \text{ км.} \quad (7)$$

Таким образом, протяженность Тунгусского взрыва на порядок меньше размеров области разрушений, поэтому его можно считать компактным единым центральным взрывом.

Как уже отмечалось выше, вывод о центральном взрыве уже был сделан в литературе [4], в сущности, этот вывод непосредственно следует из радиальности вывала леса, но конкретной оценки протяженности взрыва и анализа следствий этого вывода до сих пор не было сделано.

Рассмотрим далее, какие выводы можно сделать из малой протяженности Тунгусского взрыва. В дальнейших рассуждениях будем исходить из очень простого и очевидного факта, что независимо от характера и механизма взрыва космического тела неизбежным является то, что прежде чем взорваться, тело должно долететь до точки взрыва. Отсюда следует, что в любом случае к моменту взрыва (будь то «быстрое взрывообразное испарение тела», по К. П. Станюковичу [1, 5], или «быстрое взрывообразное механическое разрушение тела», по Г. И. Покровскому [13], или «быстрое взрывообразное выравнивание баллистической волны облака космической пыли», по Г. Ф. Плеханову [4] и др.) баллистическая волна, образованная летевшим телом, была уже сформировавшейся.

При малых размерах области взрыва по сравнению с областью разрушений к моменту подлета тела к области своего собственного взрыва, независимо от его дальнейшего развития механизма, еще до начала взрыва над областью разрушений (над проекцией конечного участка траектории) уже существовала баллистическая волна. На участке области разрушений вдоль проекции конечного отрезка траектории космического тела баллистическая волна пришла раньше, чем взрывная волна. Поэтому, если мощность баллистической волны была достаточной для вывала леса, то она должна была его произвести. В этом случае при малом наклоне полета тела ($\beta = 5-17^\circ$ [7]) длина активного участка траектории L , с точки зрения разрушений баллистической волной, должна быть сравнима с размерами области вывала леса, т. е. L должна быть не ме-

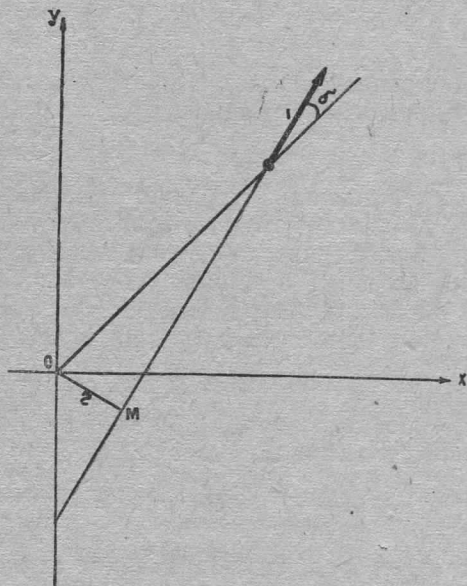


Рис. 1. Изображение поваленного дерева как вектора для обработки карты поваленного леса. 1 — поваленное дерево, 0 — эпицентр взрыва, $r-om$ — линейное отклонение направления поваленного дерева от эпицентра, δ — угловое отклонение направления дерева от эпицентра.

нее 25—30 км. При малой протяженности Тунгусского взрыва область разрушений делится на две части:

1) область, в которой баллистическая волна пришла раньше взрывной волны — юго-восточная часть области вывала леса, расположенная вдоль конечного участка траектории;

2) область, в которой, наоборот, взрывная волна пришла раньше баллистической волны — северо-западная часть области разрушений. От места взрыва до границы области разрушений, т. е. в среднем на расстояние 25 км, ударная волна взрыва распространяется в течение более 60 сек. Следовательно, в пределах области разрушений вдоль проекции траектории космического тела существуют участки, на которые баллистическая волна на несколько десятков секунд пришла раньше взрывной волны. При достаточной мощности баллистическая волна должна успеть повалить деревья на этих участках еще до прихода взрывной волны.

Таким образом, если мощность баллистической волны была достаточной для вывала леса, то в условиях взрыва тунгусского космического тела (малая высота взрыва и малый угол наклона траектории космического тела) она должна произвести полосовой осесимметрический вывал леса. Причем эта полоса должна пересекать всю область разрушений вдоль траектории от края вывала леса до района эпицентра (рис. 2).

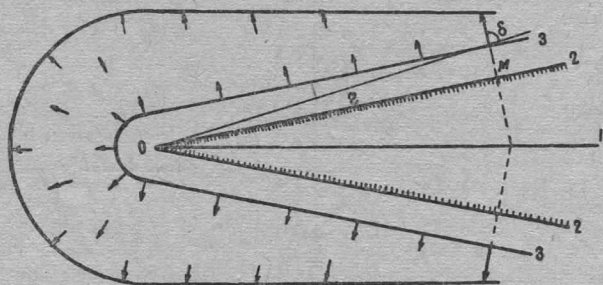


Рис. 2. Схема вывала леса баллистической волной при малом наклоне и малой высоте полета космического тела: 1 — проекция траектории космического тела, 2 — проекция баллистической волны в момент взрыва, 3 — проекция баллистической волны после взрыва, O — эпицентр взрыва, $r = OM$ — линейное отклонение направления поваленного дерева от эпицентра, δ — угловое отклонение направления поваленного дерева от эпицентра.

Поскольку ударная волна валит дерево перпендикулярно своему фронту, а проекция фронта баллистической волны в момент взрыва проходит через эпицентр, то при вывале леса баллистической волной должны выполняться следующие условия:

1. Должны существовать углы отклонения направлений поваленных деревьев от направления на эпицентр, близкие к 90° , $\delta = 90$ (рис. 2).

2. На периферии области разрушений должны существовать линейные отклонения r направлений поваленных деревьев от эпицентра, сравнимые с радиусом области разрушений $r = 25\text{—}30$ км (рис. 2).

Причем первое условие является необходимым условием вывала леса баллистической волной при малом наклоне траектории и малой высоте взрыва космического тела.

Проведем статистический анализ угловых δ и линейных r отклонений направлений поваленных деревьев от центра разрушений (рис. 1), по фактическим данным карты поваленного леса.

На рис. 3 и 4 представлены распределения угловых отклонений δ и распределение линейных отклонений r направлений поваленных деревьев от центра совокупности всех поваленных деревьев, как векторов. Рис. 3 и 4 показывают, что из всей совокупности поваленных деревьев,

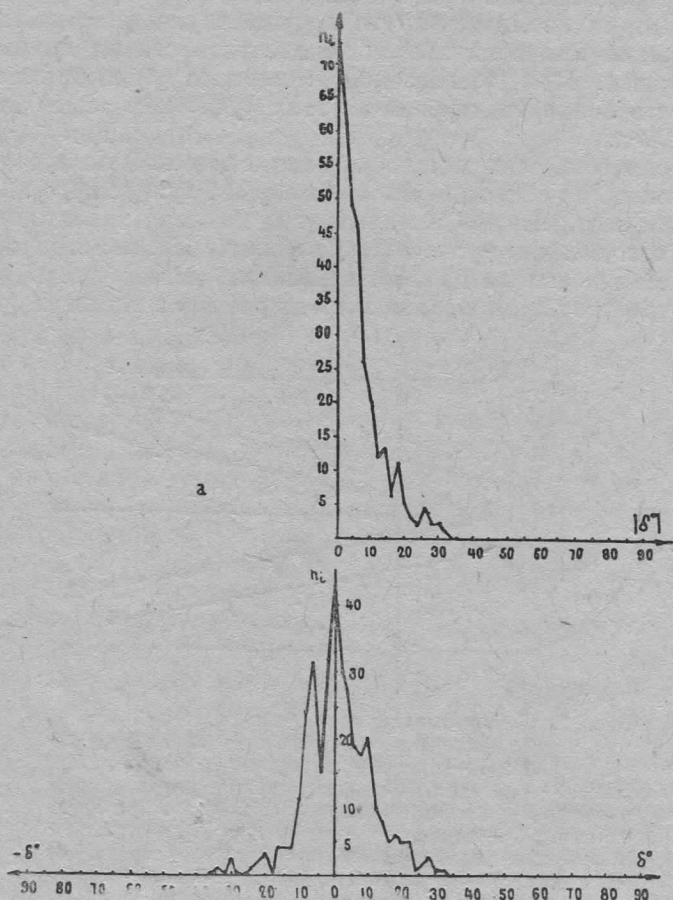


Рис. 3. Распределение угловых отклонений δ направлений поваленных деревьев от эпицентра в районе Тунгусского взрыва 1908 г. Интервал группирования $\Delta\delta = 2^\circ$.

нет ни одного с углом отклонения от эпицентра, превышающим 33° , при среднем квадратичном угле отклонения $\sigma(\delta) = 7^\circ$, т. е. $\delta \ll 90^\circ$ и нет ни одного с линейным отклонением от центра разрушений, превышающим 10 км, при среднем квадратичном отклонении $\sigma(r) = 1,9$ км, т. е. $r \ll 30$ км.

Таким образом, на основании анализа карты поваленного леса можно сделать вывод, что при Тунгусском взрыве баллистическая волна движавшегося космического тела вывала леса не произвела, она не повалила

ни одного дерева, во всей области разрушений вывал леса был произведен только взрывной сферической волной. Факт вывала леса в основном взрывной сферической волной отмечается и другими авторами [5].

По существу, этот вывод является очевидным и непосредственным следствием факта радиальности вывала леса. И действительно, если интенсивность баллистической волны больше интенсивности взрывной волны, то вывал леса должен иметь полосовой осесимметричный характер, чего не наблюдается в действительности. Если же интенсивность взрывной волны больше интенсивности баллистической волны, то вывал леса

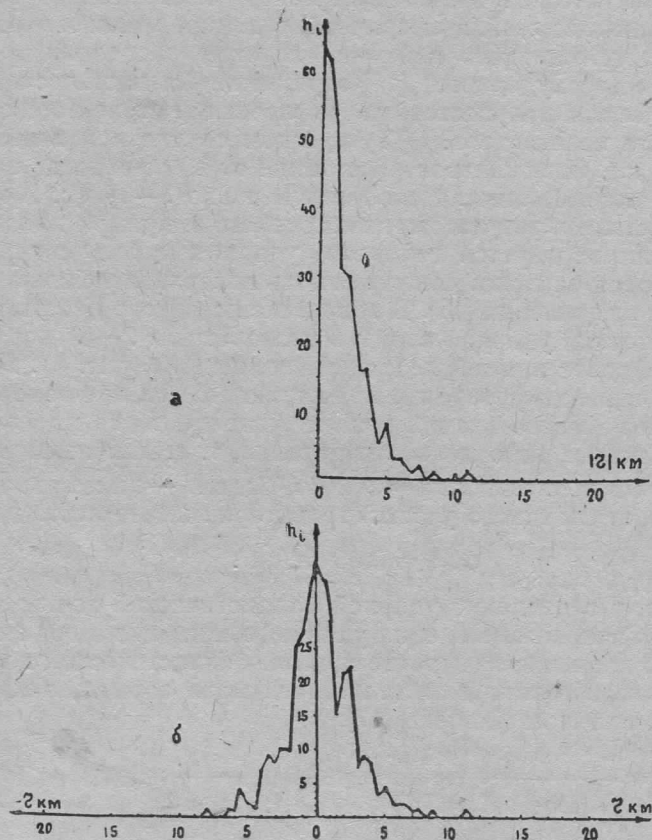


Рис. 4. Распределение линейных отклонений r направленных поваленных деревьев от эпицентра в районе Тунгусского взрыва 1908 г. Интервал группирования $\Delta r = 0,5$ км.

должен иметь радиальный характер, что и наблюдается в действительности. Новым результатом статистической обработки карты поваленного леса является оценка протяженности Тунгусского взрыва и вывод о том, что при малой протяженности взрыва к моменту его наступления баллистическая волна существовала над областью разрушений, но ее мощность была меньше мощности взрывной волны и была недостаточной, чтобы произвести вывал леса. Это обстоятельство является существенным, так как оно определяет верхнее значение энергии баллистической волны.

Из экспериментальных данных по крупным взрывам известно, что избыточное давление на фронте ударной волны, которая валит деревья равно $0,1-0,14$ кг/см² [14]. Тогда в любой точке в пределах всей области

разрушений на земной поверхности избыточное давление на фронте баллистической волны не могло быть более $0,1 \text{ кг/см}^2$, так как баллистическая волна вывала леса не производила. Таким образом, для баллистической волны имеет место условие:

$$\Delta P_0 \leq 0,1 \text{ кг/см}^2, \quad (8)$$

которое выполняется во всей области разрушений, в том числе и в зоне максимального действия баллистической волны.

Это условие можно использовать для оценки верхнего значения энергии баллистической волны Тунгусского космического тела.

Так же как и взрывная сферическая волна, баллистическая волна имеет зону максимального действия, которая расположена в области нерегулярного (треударного) [15] отражения баллистической волны от поверхности Земли на расстоянии от проекции траектории примерно равным высоте полета тела. В Тунгусском случае при взрыве тела на высоте 5—10 км, минимальное расстояние от эпицентра до зоны максимального действия баллистической волны равно 7—14 км. В зоне максимального действия в результате взаимодействия прямой падающей и отраженной волн образуется головная ударная волна с вертикальным фронтом, которая распространяется вдоль поверхности Земли и производит основные разрушения [15]. В зоне максимального действия давление на фронте головной ударной волны в несколько (в 2—5) раз превышает давление на фронте прямой падающей волны [16] (рис. 5). Поэтому избыточное давление на фронте прямой падающей волны в зоне максимального действия не менее чем в 2 раза меньше давления на фронте головной ударной волны, которая валит деревья, т. е. для прямой баллистической волны на расстоянии $r_2 = \sqrt{2} \cdot H$ (где H — высота взрыва космического тела) от конечного участка траектории имеет место неравенство:

$$\Delta P_0 = 0,05 \text{ кг/см}^2. \quad (9)$$

Известно, что давление ударной баллистической волны можно рассматривать по законам движения ударной волны цилиндрического взрыва [17]. Тогда давление на фронте прямой баллистической волны можно рассчитать по формулам для цилиндрического взрыва, эквивалентного действию баллистической волны [17]:

$$\frac{\Delta P_0}{\bar{P}_1} = \frac{4\gamma}{(\gamma + 1) \cdot \left(\sqrt{16\sqrt{2} \gamma \alpha R_2^{3/2} + 1} - 1 \right)}; \quad 2 \leq R_2 < \infty, \quad (10)$$

$$\text{где } R_2 = \frac{r_2}{r_0} \text{ — безразмерный параметр,} \quad (11)$$

r_2 — радиус ударной волны в метрах,

$$r_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\bar{P}_1}} \text{ — динамическая длина цилиндрического взрыва в метрах,} \quad (12)$$

E_0 — энергия взрыва на единицу длины в кгм,

$\bar{P}_1$ — среднее значение давления в кг/см^2 , в нижнем слое атмосферы толщиной, равной высоте взрыва,

γ — показатель адиабаты Пуассона,

α — постоянный множитель, для цилиндрического взрыва $\alpha = 0,983$.

Подставив значение избыточного давления на фронте баллистической волны $\Delta P_0 = 0,05 \text{ кг/см}^2$ в формулу (10), получим значение безразмерного параметра R_2 . Подставив далее найденное значение R_2 и расстояние $r_2 = \sqrt{2} \cdot H$ в формулу (11), получим значение динамической

длины r_0 эквивалентного цилиндрического взрыва. Далее, по значению r_0 и формуле (12) определим максимальное значение удельной энергии E_0 цилиндрического взрыва, эквивалентного действию баллистической волны.

По значению динамической длины r_0 эквивалентного цилиндрического взрыва имеется возможность определить и размеры космического тела. С точки зрения образования баллистической волны, космическое тело,

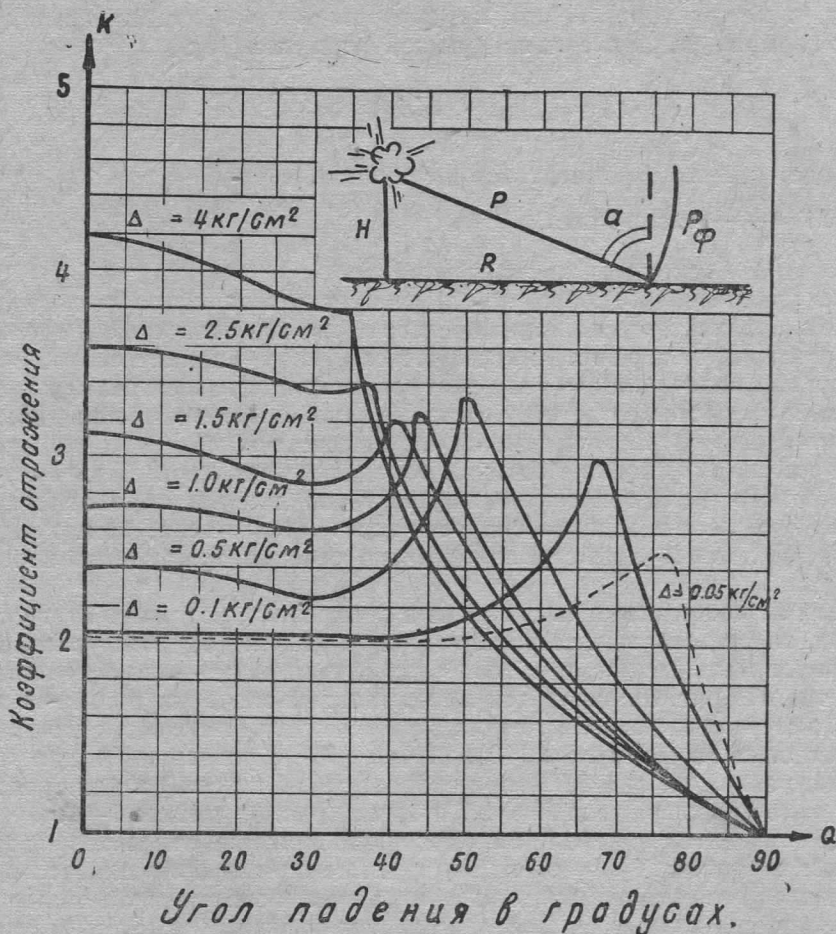


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения K от угла падения α и избыточного давления на фронте падающей волны ΔP .

независимо от его природы и структуры, имеет вполне определенные эффективные размеры.

И действительно, если, по мнению авторов работы [4], космическое тело, как облако пыли, могло образовать единую, общую для центрального сгустка (роя частиц) баллистическую волну, которая в результате резкого торможения «выравнилась» в сферическую волну и произвела все разрушения в тайге, то с точки зрения образования баллистической волны этот сгусток пыли должен иметь соответствующее эффективное сечение. А если же рой частиц был настолько редким, что каждая частица или пылинка образовала отдельную самостоятельную баллистическую волну, то в этом случае не будет ни эффективных размеров тела, ни об-

щей единой для всего роя баллистической волны. Таким образом, если какое-либо тело, независимо от структуры (монокристалл или рой частиц), при сверхзвуковом полете в атмосфере образовало единую баллистическую волну, то оно имеет вполне определенное значение эффективного поперечного сечения, которое можно рассчитать по известным параметрам баллистической волны.

Связь между диаметром d_s эффективного поперечного сечения тела, летящего со сверхзвуковой скоростью v и образующего баллистическую волну, и между характерным параметром эквивалентного цилиндрического взрыва r_0 выражается следующей формулой [18]:

$$r_0 = \sqrt{\frac{c_x \gamma}{2}} \cdot M d_s \quad (13)$$

где c_x — коэффициент сопротивления,

$M = \frac{v}{a_1}$ — число Маха,

a_1 — скорость звука в воздухе.

Из уравнений (10), (11) и (13) следует, что величина динамической длины эквивалентного цилиндрического взрыва r_0 полностью и однозначно характеризует параметры космического тела и баллистической волны, образуемой полетом этого тела в атмосфере; при известном r_0 каждому значению скорости соответствует вполне определенное значение диаметра эффективного поперечного сечения космического тела.

Формула (13) показывает, что, определив характерный параметр эквивалентного цилиндрического взрыва r_0 по данным обработки карты поваленного леса и задавая скорость космического тела, можно определить эффективный диаметр поперечного сечения тунгусского космического тела.

Для каждого значения скорости в конкретных условиях Тунгусского взрыва, описанных выше, формулы (10), (11) и (13) при условии (9) дают максимальные размеры тела (для случая шара — его эффективный диаметр). На рис. 6 приводятся максимальные значения диаметра поперечного сечения космического тела в зависимости от скорости его полета, рассчитанные по формулам (10), (11) и (13) и условию (9) для минимального значения $c_x = 0,92$ (при скорости $v > 1$ км/сек.) и для трех значений высоты взрыва тела $H = 5,7$ и 10 км (рис. 6) кривые 1—3.

До сих пор мы не делали никаких предположений относительно механизма и характера Тунгусского взрыва. Все оценки получены только на основании фактических данных о вывале леса и экспериментальных данных по крупным взрывам. Полученные конкретные параметры баллистической волны накладывают вполне определенные ограничения на размеры d_s и скорость v космического тела. Как уже отмечалось выше, с точки зрения образования баллистической волны космического тела, независимо от его природы и структуры, можно рассматривать как единое целое с определенными эффективными размерами. Поэтому при рассмотрении любой гипотезы о Тунгусском явлении, независимо от точки зрения исследователя, по-видимому, необходимо учитывать полученную зависимость между размерами тунгусского космического тела и его скоростью, представленную на рис. 6. Графики на рис. 6 (кривые 1—3) дают четкое представление о возможных значениях максимальных размеров тунгусского космического тела в зависимости от его скорости. Например, если авторы работы [4] считают, что тунгусское космическое тело имело скорость 10—50 км/сек, то даже при минимальной скорости $v = 10$ км/сек тело могло иметь диаметр эффективного поперечного сечения не более 70 м, а при скорости $v = 50$ км/сек — не более 14 м.

Если бы тело имело большие размеры, то при этих скоростях оно образовало бы более мощную баллистическую волну, которая должна была бы произвести полосовой вывал леса, чего не наблюдается в действительности (рис. 3 и 4). Но при этих размерах (14—70 м) тунгусское космическое тело облаком космической пыли или роем частиц, по-видимому, быть не может.

Кривые 1—3, представленные на рис. 6, получены на основании фактического материала, они имеют объективное содержание, поэтому при решении вопроса о возможности пылевой или какой-либо другой струк-

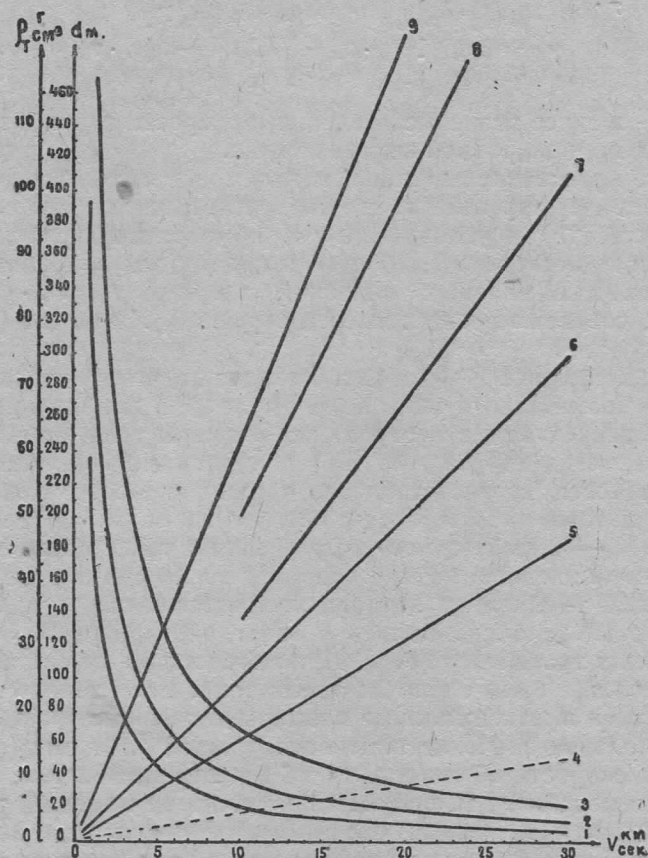


Рис. 6. Зависимость диаметра (1—3) и плотности (4—9) космического тела от скорости при различной высоте взрыва.

1. $H=5$ км, $r_2=7$ км, $c_x=0,92$.
2. $H=7$ км, $r_2=10$ км, $c_x=0,92$.
3. $H=10$ км, $r_2=14$ км, $c_x=0,92$.
4. $H=10$ км, $r_2=14$ км, $c_x=0,92$, $E_K=4 \cdot 10^{23}$ эрг.
5. $H=7$ км, $r_2=10$ км, $c_x=0,92$, $E_K=2,5 \cdot 10^{23}$ эрг.
6. $H=7$ км, $r_2=10$ км, $c_x=0,92$, $E_K=2,5 \cdot 10^{23}$ эрг.
7. $H=10$ км, $r_2=14$ км, $c_x=3,6$, $E_K=4 \cdot 10^{23}$ эрг.
8. $H=7$ км, $r_2=10$ км, $c_x=2,0$, $E_K=2,5 \cdot 10^{23}$ эрг.
9. $H=5$ км, $r_2=7$ км, $c_x=0,92$, $E_K=2 \cdot 10^{23}$ эрг.

туры тунгусского космического тела с этими данными не считаться нельзя — их необходимо учитывать.

Теперь сделаем предположение, что взрыв космического тела и все разрушения в тайге произведены за счет кинетической энергии этого тела. Тогда будет иметь место соотношение

$$E_{\pi} \leq E_k = \frac{m_k v_k^2}{2}, \quad (14)$$

связывающее полную энергию E_{π} , выделившуюся при взрыве, конечную массу m_k и скорость v_k космического тела с его кинетической энергией E_k . При этом предположении из формул (10), (11) и (13) и соотношения (14) найдем минимальные значения возможной плотности космического тела ρ_T :

$$\rho_T = 6,86 \cdot 10^{-2} \cdot c_x^{3/2} \frac{E_k}{r_2^3 a_1^3} \left(\frac{\Delta P}{P_1} \right)^{-4} \cdot v, \quad (15)$$

где $\bar{P}_1$ и $\bar{a}_1$ — среднее значение давления и скорости звука в нижнем слое атмосферы толщиной, равной высоте взрыва.

На рис. 6 представлены кривые зависимости минимально возможной плотности космического тела от его скорости, вычисленные соответственно по формуле (15) и условию (9). Кривые рассчитаны для $H=5, 7$ и 10 км, r_2 соответственно 7, 10 и 14 км; для трех значений $c_x=0,92$; 2 и 3,6 и трех минимальных значений энергии $E_k=2 \cdot 10^{23}$; $2,5 \cdot 10^{23}$ и $4 \cdot 10^{32}$ эрг, соответствующих высоте взрыва 5, 7 и 10 км (рис. 6, кривые 4—9).

Физические кривые 4—9 на рис. 6 означают, что, задавая определенную скорость космического тела, по формуле (14) находим необходимую массу и вкладываем ее в максимальные размеры тела, определенные по формуле (13), тогда по формуле (15) получаем минимально возможное значение плотности, соответствующее данной скорости этого тела. Например, если авторы работы [4] считают, что космическое тело двигалось со скоростью 10—50 км/сек и все разрушения в тайге произошли за счет его кинетической энергии, то при скорости 10 км/сек оно должно иметь массу около 800 тысяч тонн, которая необходима для того, чтобы кинетическая энергия тела сравнялась с энергией взрыва $E_k=4 \cdot 10^{23}$ эрг (около 10 млн. т тротила) [5, 8, 9]. При скорости 50 км/сек необходимая масса тела должна быть около 32 тысяч тонн. Если теперь мы вложим эти 800 тыс. тонн в максимальные размеры тела диаметром 70 м, то получим минимальное значение плотности, равное 4,5 г/см³ (рис. 6, кривая 4), а при скорости 50 км/сек, когда мы вложим 32 тыс. тонн в размеры тела диаметром 14 м, получим плотность не менее 22 г/см³.

Если не считаться с этими расчетами и принять для космического тела меньшую плотность, то при той же массе тело будет иметь большие размеры. Тогда, двигаясь с той же скоростью, тело с большими размерами создаст более мощную баллистическую волну, которая должна произвести полосовой вывал леса, что противоречит действительности. Отсутствие полосового вывала леса ограничивает верхнее значение энергии баллистической волны. Исходя из соотношения (14), при известной скорости это обстоятельство ограничивает размеры и плотность космического тела. При скорости 10 км/сек космическое тело не может иметь плотность менее 4,5 г/см³. Если даже принять, что протяженность тела была в несколько раз больше диаметра поперечного сечения, то и в этом случае плотность тела не может быть меньше 1—5 г/см³ соответственно для скорости 10 и 50 км/сек.

Таким образом, при скорости 10 км/сек и более эффективный диаметр космического тела не мог быть более 50—70 м, а соответствующая плотность не могла быть менее 4,5 г/см³ (или 1 г/см³ для сильно вытя-

нутаго тела). Но при таких размерах и плотности тунгусское космическое тело, по-видимому, не могло быть роем частиц или облаком космической пыли.

Эти выводы мы получили из простого и очевидного факта, что вывал леса имеет радиальный характер и произведен взрывной волной, что поэтому мощность баллистической волны слабее взрывной волны. Определенное значение мощности баллистической волны, которая существовала над областью разрушений, но не произвела вывал леса, накладывает вполне определенные ограничения на размеры и скорость тела.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что независимо от своей природы тунгусское космическое тело должно быть компактным и достаточно плотным единым телом с эффективным диаметром не более нескольких десятков метров.

Рассмотрим другую гипотезу о Тунгусской катастрофе, которая основана на предположении о возможности так называемого «теплого взрыва» монолитного космического тела при полете в плотных слоях атмосферы за счет его кинетической энергии [1].

Так называемый «тепловой взрыв» тунгусского космического тела по К. П. Станюковичу, возможен при конечной скорости $v_k = 30$ км/сек [1, 5]. Тогда диаметр космического тела не может быть более 23 м (рис. 6, кривая 3), а соответствующая плотность тела не может быть меньше 13 г/см³ (рис. 6, кривая 4). (В действительности тело должно иметь плотность около $50\text{--}100$ г/см³ (рис. 6, кривая 7), так как при скорости 30 км/сек значение c_x равно не $0,92$ как это принято в расчете минимальных значений ρ_T , а значительно больше: $c_x = 3\text{--}4$ [1]. Если плотность принять меньше этого значения, то в предположении, что тело взорвалось за счет кинетической энергии для того, чтобы сохранить необходимую массу, оно должно иметь большие размеры, чем 23 м. Но при больших размерах при скорости 30 км/сек баллистическая волна будет иметь большую мощность и должна будет произвести полосовой вывал леса, что не наблюдается в действительности.

Таким образом, с точки зрения гипотезы Станюковича мы приходим к дилемме:

1. Либо мы должны считать тело сверхплотным, $\rho_T = 13$ г/см³ и более.
2. Либо должны отказаться от предположения, что взрыв тела произошел за счет его кинетической энергии и считать, что тело взорвалось за счет внутренней энергии самого тела — химической или ядерной. При этом предположении соотношение (14) не имеет места и вышеизложенные противоречия устраняются.

Эти примеры наглядно показывают, насколько важно при изучении тунгусской проблемы учитывать соотношение интенсивностей взрывной и баллистической волны.

Оценка верхнего значения мощности баллистической волны дает еще одну очень интересную возможность анализа возможных значений параметров космического тела. Предположим, что взрыв космического тела произошел за счет его кинетической энергии. Тогда согласно формуле (14) при определенной скорости тело должно иметь определенную массу, необходимую для создания наблюдаемой мощности взрыва. По известной массе и плотности для каждого конкретного тела (например, ледяного — $\rho_T = 1$ г/см³, каменного — $\rho_T = 3$ г/см³ и железного — $\rho_T = 7,8$ г/см³) определяются его размеры. По известной скорости и размерам тела определяется интенсивность баллистической волны. Эта задача достаточно хорошо разработана в литературе [17, 18]. И наоборот, если задана интенсивность баллистической волны, то по известному параметру r_0 и размерам тела определяется скорость этого тела.

Кривая 4 на рис. 6 показывает что в тунгусском случае ледяное, каменное и железное тело на конечном участке пути могут иметь скорость соответственно не более 2, 7 и 18 км/сек. Если бы эти тела имели большую скорость, то они образовали бы более мощную баллистическую волну и произвели бы полосовой вывал леса, чего не наблюдается в действительности. Например, при скорости 30 км/сек ледяное тело должно иметь массу около 90 тысяч тонн и диаметр около 55 м. При таких размерах и скорости на конечном участке пути при подлете к точке взрыва ледяное тело должно произвести полосовой вывал леса шириной около 100 км, каменное тело — около 70 км, железное тело — около 40—50 км. Ничего подобного в действительности не наблюдается.

Таким образом, реальные (ледяное, каменное и железное) тела с плотностью 1—8 г/см³ в тунгусских условиях не могли иметь скорость более 2, 7 и 18 км/сек (в действительности эти скорости должны быть еще меньше, так как к реальным условиям ближе подходит кривая 5 (рис. 6), по которой скорости будут равны соответственно 0,6; 2 и 5 км/сек.). Но при таких малых скоростях взрыв космического тела в воздухе за счет его кинетической энергии невозможен [1]. При таких скоростях тело должно было упасть на Землю как обычный метеорит.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что тунгусское космическое тело не могло быть облаком космической пыли или роем частиц, т. е. оно не могло быть кометой, оно не могло быть также и обычным ледяным, каменным или железным метеоритом.

Тунгусское явление представляет собой, по-видимому, новое еще неизвестное и более сложное явление природы, чем это считалось до сих пор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станюкович К. П., Шалимов В. П. О движении метеорных тел в атмосфере Земли. Метеоритика, вып. 20, 54, 1960.
2. Бронштэн В. А. К вопросу о движении в атмосфере Тунгусского метеорита. Метеоритика, вып. 20, 72, 1960.
3. Фесенков В. Г. О природе комет и условиях падения их на Землю. Метеоритика, вып. 21, 3, 1961.
4. Плеханов Г. Ф. и др. Некоторые итоги изучения проблемы Тунгусского метеорита. Геология и Геофизика, № 1, 111—122, 1963.
5. Станюкович К. П., Бронштэн В. А. О скорости и энергии Тунгусского метеорита. ДАН СССР, т. 140, № 3, 583, 1961.
6. Флоренский К. П. Проблема космической пыли и современное состояние изучения Тунгусского метеорита. Геохимия, № 3, 1963.
7. Кринов Е. Л. Тунгусский метеорит. Изд-во АН СССР, 1949.
8. Золотов А. В. Новые данные о Тунгусской катастрофе, 1908. ДАН СССР, т. 136, № 1, 84, 1961.
9. Маслов Е. В. К вопросу о высоте и мощности взрыва Тунгусского метеорита. Сб. ст. «Проблема Тунгусского метеорита». Изд. Томского университета. Труды Географического общества СССР (Томский отдел), том № 5, 1963.
10. Щиголов Б. М. Математическая обработка наблюдений. Физматгиз, 1962.
11. Фаст В. Г. К определению эпицентра взрыва Тунгусского метеорита по характеру вывала леса. Сб. ст. «Проблема Тунгусского метеорита». Изд. Томского университета. Труды Географического общества СССР (Томский отдел), том № 5, 1963.
12. Садовский М. А. Опытные исследования механического действия ударной волны взрыва. Труды сейсмологического института, № 116, Изд. АН СССР, 1945.
13. Покровский Г. И. О возможных механических явлениях при движении метеорных тел. Метеоритика, вып. 20, 1961.
14. Гвоздев М., Яковкин В. Атомное оружие и противоатомная защита. Изд. ДОСААФ, М., 1958.
15. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. Судпрогиз, 1961.
16. Глушко А. П. Атомное оружие и противоатомная защита. Военизгиз, 1958.
17. Коробейников В. П. и др. Теория точечного взрыва. Физматгиз, 1961.
18. Черный Г. Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. Физматгиз, 1959.