

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ И МАССЫ ТУНГУССКОГО БОЛИДА

1. Введение

Выполненные в 70-х годах теоретические и расчетные исследования, опирающиеся на данные полевых работ в районе Тунгусского падения, оказались существенной предпосылкой к пониманию этого редкого природного явления [2-4, 10-12, 14].

Однако, как расчеты, так и натурное моделирование не привели к существенному уточнению количественных характеристик явления, установленных ранее. Важные детали и особенности разрушений и других следов катастрофы на основе аэродинамических моделей объяснения не получили. Тщательный анализ сейсмограмм и барограмм 1908 года, выполненный Пасечником [14], также не позволил уменьшить интервалы неопределенности, с которой оценены важнейшие характеристики явления (троиловый эквивалент, доля световой энергии, масса, высота взрыва, крутизна траектории и др.).

Из рассчитанных аэродинамических моделей не вытекают естественным образом световые, термические, магнитные эффекты. Для их интерпретации требуется конструирование специальных моделей.

Попытка комплексного описания картины явления в целом была сделана Золотовым [8], однако полученные им результаты пока не были подвергнуты серьезному анализу и содержательной критике.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования являются, по нашему мнению, лишь «нулевым приближением» к реальной картине катастрофы, зафиксированной в картах и каталогах вывала, ожога, магнитных и биосферных аномалий, наблюдений очевидцев. Использование этой информации должно существенно сузить неопределенность оценок количественных параметров явления, ближайшим аналогом которого по-прежнему остается высотный ядерный взрыв.

В настоящей работе сделана попытка анализа возможных границ использования этой аналогии при оценке количественных параметров явления.

2. Энергия взрыва

Предположение о том, что причиной разрушений в тайге является энергия баллистической волны, а источником этой энергии - кинетическая энергия болида рассматривалось в первой работе Цикулина [18], а также в расчетных и модельных работах Коробейникова с соавторами. Это предположение не позволяет описать характер вывала и плохо согласуется с показаниями очевидцев. Поэтому большинство авторов рассматривали как один из главных вопросов проблемы соотношения взрывной и баллистической волн [2, 3, 8, 19] и предлагали разнообразные механизмы возникновения взрыва [4, 6, 8, 12].

В 60-х годах полная энергия взрыва Тунгусского метеорита оценивалась по данным исследования вывала, по барическим, сейсмическим и магнитным возмущениям как величина порядка 10^{16} - 10^{17} Дж (2 - 10 Мт). Количественный анализ барограмм и сейсмограмм Пасечником привел его к заключению, что энергия взрыва была порядка $8 \cdot 10^{16}$ - $2 \cdot 10^{17}$ Дж (20 - 50 Мт) [14]. Последняя оценка этой величины Бронштэном на основе расчетов ударных волн - 40 Мт. Бронштэн допускает, что она могла быть и в 2 -3 раза ниже - $6 \cdot 10^{16}$ - $8 \cdot 10^{16}$ Дж (13 - 20 Мт) [3]. По мнению Коробейникова с соавторами, оценка суммарной энергии взрывной и баллистической волн по расчетам Бояркиной и Бронштэна должны давать значение полной энергии 150 - 250 Мт, что противоречит оценке Пасечника [11, 14].

Пасечник отмечает, что наиболее точная оценка энергии может быть сделана не по барограммам, а по площади вывала леса и называет в качестве такой оценки величину 40 Мт ($1,7 \cdot 10^{17}$ Дж), однако, он не приводит расчет, дающий эту важную характеристику явления. Понятие «площади вывала» приобретает определенный физический смысл лишь при наличии калибровки изодинам ударной волны. Хотя подробные карты скоростного напора, валившего деревья, рассчитаны, их точная калибровка не проведена до сих пор. Пока такая калибровка наиболее объективно может быть сделана по данным аэрофотосъемки лесных массивов в районе Тунгусского падения. След ударной волны на поверхности Земли может быть восстановлен не только по данным наземной съемки погибшего леса, но и по спектральным и контрастным различиям аэрофотоснимков старого и послекатастрофного леса. Граница между старым и молодым лесом, установленная Д. Ф. Анфиногеновым в результате дешифровки аэрофотоснимков лесных массивов, образует характерный контур «бабочки без головы», охватывающий значительно меньшую площадь, чем полная территория вывала, площадь которой оценена Фастом как 1250 ± 50 км² [17]. Если площадь, занятую, преимущественно, катастрофным лесом, отождествить с «зоной сильных разрушений» лесных массивов, определяемой при ядерных взрывах как зона 90 %-ного повала леса [13], то границу этой площади можно откалибровать как линию, на которой максимальное избыточное давление составляло $0,35$ кгс/см² (рис. 6 в статье Маслова [13]), а скорость воздушного напора за фронтом ударной волны 60 ± 1 м/с [9].

Сложный характер границы площади, околонтурной Анфиногеновым, затрудняет ее точное измерение. Для того, чтобы свести к минимуму ошибку при измерении этой площади, мы применили способ взвешивания вырезки этой площади на аналитических весах (погрешность $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г). Вес прямоугольника из листа фотобумаги, на котором был изображен контур по Анфиногенову, выполненный в масштабе 0,5 км в 1 мм, составлял 0,960 г. Прямоугольник соответствовал площади 1280 км². Вырезка контура имела вес 0,375 г, отсюда площадь контура

$$S_A = \frac{0,375 \cdot 1280}{0,960} = 500,0 \text{ км}^2$$

Если бы зона сильных разрушений имела форму круга, то радиус этого круга

$$R_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{500}{3,14}} = 12,6 \text{ км}$$

Воспользуемся формулой, описывающей радиус площади разрушений при мощных взрывах [9]:

$$S = a_0 \cdot q^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где q - тротильный эквивалент взрыва, $a_0 = \text{const}$. Константу a_0 можно определить, используя экспериментальные данные, приведенные в [9] в качестве примеров. Так, для заряда с $q = 10^8 \text{ кг}$ $S = 8,79 \text{ км}^2$. Тогда

$$a_0 = \frac{S}{q^{\frac{2}{3}}} = \frac{8,79 \cdot 10^6}{10^{\frac{16}{3}}} = 41 \frac{\text{М}^2}{\text{кг}^{\frac{2}{3}}}$$

Проверка этого значения a_0 на других примерах дает основание считать, что точность ее определения таким способом находится в пределах $\pm 5\%$. Поэтому тротильный эквивалент, соответствующий полной энергии Тунгусского взрыва, по формуле (1) будет:

$$q = \left(\frac{S}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{5 \cdot 10^8}{41}\right)^{\frac{3}{2}} = 4,6 \text{ Мт},$$

что хорошо согласуется с оценкой Пасечника [14] и Скорера [20].

Теперь оценим тротильный эквивалент Тунгусского взрыва по тем же эмпирическим данным, но на основе другого соотношения - формулы Садовского [1, 16].

Для расстояний, в сотни раз превышающих размеры заряда, может быть применен упрощенный вариант этой формулы:

$$\Delta P = 0,84 \frac{q^{\frac{1}{3}}}{R} \quad (2)$$

Взяв $\Delta P = 0,35 \text{ кгс/см}^2$ и полученное выше значение $R_{\text{эф}}$, найдем:

$$q = \left(\frac{\Delta P \cdot R_{\text{эф}}}{0,84}\right)^3 = \left(\frac{0,35 \cdot 1,2 \cdot 10^4}{0,84}\right)^3 = 145 \text{ Мт}.$$

Величина такого же порядка получается из модели Бояркиной и Бронштэна. Коробейников, Чушкин и Шуршалов [11] считают это значение нереальным, получающимся вследствие неправильной модели болида (выбора наклона траектории, массы и скорости). Однако, мы видим, что такие же значения тротилового эквивалента получаются и на основе эмпирических данных о зоне разрушений в тайге, если для расчета используется соотношение (2), описывающее действие химического взрыва.

3. Концентрация энергии

Как показано выше, оценка тротилового эквивалента Тунгусского взрыва по разным формулам приводит к расхождению в 3,4 раза. Это обстоятельство не случайно и имеет простой физический смысл.

На больших расстояниях от заряда формула Садовского может быть использована в виде [16]:

$$\Delta P = \frac{a \cdot U^{\frac{1}{3}} \cdot P_0^{\frac{2}{3}} \cdot q^{\frac{1}{3}}}{R} \quad (3)$$

Здесь U - концентрация энергии заряда на единицу его массы, именуемая также удельной энергией заряда, Дж/кг, P_0 - атмосферное давление в невозмущенном воздухе, Н/м², R - расстояние от центра взрыва до фронта ударной волны с избыточным давлением ΔP , м, q - масса заряда (тротильный эквивалент), кг, a - константа. Формулу (3) можно применять для расчета избыточного давления взрыва любой природы. При этом q имеет смысл тротилового эквивалента, произведение $aU^{1/3}$ для взрывов различной природы будет иметь разное значение, а энергия ударной волны \mathcal{E} будет связана с тротильным эквивалентом соотношением:

$$\mathcal{E} = \eta q, \quad (4)$$

где $\eta < 1$ - к.п.д. образования ударной волны. Для химического взрыва принимают $\eta \approx 1$, для ядерного - $\eta \approx 0,5$.

Неучет формулы (4), а также того обстоятельства, что удельная энергия ядерного взрыва, по крайней мере, на 8 порядков выше удельной энергии химического, абляционного, фазового, теплового взрывов является причиной расхождений при расчетах тротилового эквивалента Тунгусского взрыва.

Покажем, что это так на численных примерах. В формуле (3) обозначим индексом «Т» величины, относящиеся к тротильному взрыву, индексом «Я» - к ядерному взрыву. Подставим в (3) экспериментальные значения для химического взрыва в воздухе, приведенные в [1]: $q_T = 1 \cdot 10^4$ кг, $U = 4 \cdot 10^6$ Дж/кг, $R_T = 129$ м, $\Delta P_T = 0,247$ кгс/см² = $2,4 \cdot 10^4$ Н/м², $P_0 = 9,8 \cdot 10^4$ Н/м² (стр. 356 - 357).

$$a_T = \frac{\Delta P_T \cdot R_T}{U_T^{\frac{1}{3}} \cdot P_0^{\frac{2}{3}} \cdot q_T^{\frac{1}{3}}} = \frac{2,4 \cdot 10^4 \cdot 129}{1,59 \cdot 10^2 \cdot 2,13 \cdot 10^3 \cdot 21,5} = 0,425$$

Таким же путем найдем коэффициент a для ядерного взрыва по экспериментальным данным, приведенным в [9, стр. 111].

При взрыве в Хиросиме тротильный эквивалент $q_Y = 2 \cdot 10^7$ кг = 20 кт, $U_Y = 8,4 \cdot 10^{13}$ Дж/кг, $R_Y = 800$ м, $\Delta P_Y = 1,25$ кгс/см² = $1,22 \cdot 10^5$ Н/м², $P_0 = 9,8 \cdot 10^4$ Н/м².

$$a_Y = \frac{\Delta P_Y \cdot R_Y}{U_Y^{\frac{1}{3}} \cdot P_0^{\frac{2}{3}} \cdot q_Y^{\frac{1}{3}}} = \frac{1,22 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 10^2}{4,4 \cdot 10^4 \cdot 2,13 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^2} = 4,9 \cdot 10^{-3}$$

Таким образом, для химического взрыва в воздухе

$$\Delta P_T = \frac{a_T \cdot U_T^{\frac{1}{3}} \cdot P_0^{\frac{2}{3}} \cdot q_T^{\frac{1}{3}}}{R_T} \quad (5)$$

Для ядерного взрыва в воздухе

$$\Delta P_Y = \frac{0,0049 \cdot U_Y^{\frac{1}{3}} \cdot P_0^{\frac{2}{3}} \cdot (\eta q_Y)^{\frac{1}{3}}}{R_Y} \quad (6)$$

Очевидно, что для мощных взрывов неизвестной природы (a и U не определены) значения q будут находиться в интервале между q_Y и q_T в тех случаях, когда на одинаковом расстоянии R для неизвестного и «эталонного» взрыва будет зарегистрировано избыточное давление ΔP .

Разделив (6) на (5), получим

$$\frac{\eta \cdot q_Y}{q_T} = \frac{U_T}{U_Y} \cdot \frac{a_T^3}{a_Y^3} \quad (7)$$

Используя найденные величины коэффициентов a_T и a_Y , получим соотношение масс зарядов при «сильном» и «среднем» взрыве:

$$\frac{q_Y}{q_T} = \frac{4 \cdot 10^6}{8,4 \cdot 10^{13}} \cdot \left(\frac{0,425}{0,00492} \right)^3 = 3,0 \cdot 10^{-2}$$

Найдем из формулы (7) удельную энергию Тунгусского взрыва $U_{\text{тм}}$. Коэффициент $a_{\text{тм}}$ для взрыва Тунгусского болида неизвестен. Однако он, как и удельная энергия, очевидно, должен находиться в пределах между $a_{\text{т}}$ и $a_{\text{я}}$.

Из эмпирических данных, приведенных в разделе 3, следует, что отношение

$$\frac{U_{\text{тм}} \cdot a_{\text{тм}}^3}{U_{\text{я}} \cdot a_{\text{я}}^3} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 10^7}{4 \cdot 10^7 \cdot 10^3} = 2,5 \cdot 10^{-4}.$$

Здесь характеристики ядерного взрыва используются в качестве эталонных значений. Следовательно,

$$a_{\text{тм}}^3 \cdot U_{\text{тм}} = 0,0025 \cdot 0,0049^3 \cdot 10^{14} = 2,9 \cdot 10^6$$

Коэффициент a находится в пределах от $4 \cdot 10^{-1}$ для химического взрыва до $\approx 5 \cdot 10^{-3}$ для ядерного.

Следовательно, максимальная концентрация энергии Тунгусского взрыва составляет

$$U_{\text{тм}}^{\text{max}} = \frac{2,9 \cdot 10^6}{(5 \cdot 10^{-3})^3} = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ Дж / кг} \quad (8)$$

Расчет минимальной концентрации дает:

$$U_{\text{тм}}^{\text{min}} = \frac{2,9 \cdot 10^6}{a_{\text{т}}^3} = \frac{2,9 \cdot 10^6}{(4 \cdot 10^{-1})^3} = 4,5 \cdot 10^7 \text{ Дж / кг}, \quad (9)$$

что на два порядка выше удельной энергии известных химических и фазовых превращений. Аналогичный результат был ранее получен двумя независимыми способами - Золотовым [7, 8], который впервые обратил внимание на высокую удельную энергию Тунгусского взрыва. К выводу о высокой концентрации энергии взрыва Тунгусского болида пришел позднее Пасечник [14], который, однако, не привел расчетных обоснований этого, вообще говоря, нетривиального результата. Полученные значения $U_{\text{тм}}$ дают возможность оценить массу болида новым способом, не прибегая к оценкам его скорости. Принимая полный тротильный эквивалент взрыва, найденный по анализу барограмм и по площади разрушений в тайге, как величину, близкую к $1,8 \cdot 10^{17}$ дж, получим:

$$m_{\text{max}} = \frac{q}{U_{\text{тм}}^{\text{min}}} = \frac{1,8 \cdot 10^{17}}{4,5 \cdot 10^7} = 4 \cdot 10^9 \text{ кг} = 4 \cdot 10^6 \text{ тонн}$$

$$m_{\text{min}} = \frac{q}{U_{\text{тм}}^{\text{max}}} = \frac{1,8 \cdot 10^{17}}{2,3 \cdot 10^{13}} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг} \approx 7,8 \text{ тонн}$$

4. Обсуждение результатов

Оценка тротильного эквивалента Тунгусского взрыва Пасечником проведена путем сопоставления барограмм и сейсмограмм Тунгусского взрыва с регистрациями соответствующих эффектов для ядерных взрывов. Величина 30-50 Мт, полученная в результате этого сопоставления, относится к полному тротильному эквиваленту взрыва. Бронштэн, отмечая, что проведенный им расчет дает завышенные значения полной энергии [3], предполагает, что это обстоятельство может объясняться неучетом экспоненциального распределения плотности атмосферы. Поскольку расчеты, приведенные выше, также относятся к однородной атмосфере, рассмотрим этот вопрос подробнее. Влияние экспоненциальной функции плотности от расстояния сказывается на скорости ударной волны в том случае, если [19]

$$\frac{\Delta P}{P} \geq \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \dots \quad (10)$$

Показатель изэнтропы γ на высотах порядка 10 км равен 1,4. Избыточное давление точечного взрыва с $q = 40$ Мт на расстояниях того же порядка, что и масштаб неоднородности атмосферы (9 км), составляет около $9 \cdot 10^4$ Н/м². Атмосферное давление на высоте 10 км $P_0 = 3 \cdot 10^4$ Н/м², следовательно, отношение в левой части неравенства (10) равно 3, в правой - 60, т.е. принято выше приближение однородной атмосферы для расчета ΔP и q является обоснованным. Коробейников, Чушкин и Шуршалов [11], обсуждая результаты Бронштэна [4], делают

замечание, что при суммарной энергии ударных волн 150 Мт полная энергия, выделившаяся при пролете и взрыве тела, может достигать 250 Мт, т.е. принимают $\eta=0,6$. В теории цилиндрического взрыва, моделирующего пролет в атмосфере большого боида [19], показано, что безразмерный тротиловый эквивалент сильного цилиндрического взрыва $Q=2$. Поэтому концентрация энергии ударной волны на единицу массы за счет кинетической энергии боида не может превышать

$$U_k = Q \cdot U_T = 2 \cdot 4 \cdot 10^6 = 8 \cdot 10^6 \text{ Дж / кг}$$

Модели абляционного испарения, теплового взрыва, химического взаимодействия вещества боида с кислородом атмосферы также не могут дать удельную энергию, превышающую несколько единиц мегаджоулей/кг. Учет Мартынюком [10] возможности «фазового взрыва» в силикатном или железном монолите дает величину всего лишь $U_{tm} = 6,4 \cdot 10^6$ Дж/кг, что также не объясняет причины возникновения сильной ударной волны ($\approx 10^4$ Н/м²) на расстоянии 12 - 13 км от центра взрыва при тротиловом эквиваленте ≈ 40 Мт.

До сих пор при теоретическом анализе Тунгусского феномена основное внимание уделялось конструированию вероятного физического механизма разрушения космического тела, который обеспечил бы достаточно быстрое выделение энергии порядка 10^{17} Дж. На наш взгляд, более существенным является вопрос о механизме концентрации этой энергии в массе боидного тела, составлявшей $10^3 - 10^8$ кг. Эта оценка вряд ли может быть значительно увеличена при более точной калибровке изодинам взрыва, т.к. изолинии зоны разрушений определены достаточно надежно. Не вызывает сомнений и то, что ударная волна на большей части площади вывала была сильной.

Этот результат лучше, чем традиционные оценки, согласуется с данными, накопленными в ходе выполнения многолетней программы поисков космического вещества в торфе [5], согласно которым обнаруженная масса вещества Тунгусского боида имеет величину $\leq 10^2$ кг, т.е. 0,01 - 1 % от полной массы по нашей оценке.

Кажущаяся парадоксальность вывода об огромной энергии и малой массе источника взрыва связана, скорее всего, с неадекватностью традиционных моделей Тунгусского феномена реальному явлению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. - М.: Оборонгиз, 1960, с. 356.
2. Бояркина А. П., Бронштэн В. А., Станюкович А. К. Нестационарные взаимодействия ударных волн в газодинамических задачах метеоритики. - В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 138 - 155.
3. Бронштэн В. А. О методах расчета взрывной и баллистической волн Тунгусского метеорита. - Там же, с. 156 - 163.
4. Бронштэн В. А., Бояркина А. П. Расчеты воздушных волн Тунгусского метеорита. - В кн.: Проблемы метеоритики, Новосибирск: Наука, 1975, с. 47 - 63.
5. Васильев Н. В. Состояние проблемы Тунгусского метеорита на начало 1974 г. - Там же, с. 3 - 12.
6. Гораздовский Т. Я. Динамика взрыва Тунгусского метеорита в свете эффектов лабораторного реологического взрыва. - В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 74 - 82.
7. Золотов А. В. К вопросу о концентрации энергии при взрыве Тунгусского космического тела. - Ж. технич. физики, 1967, вып. 11, с. 2089 - 2100.
8. Золотов А. В. Проблема Тунгусского катастрофы 1908 г. - Минск: Наука и техника, 1969, 202 с.
9. Иванов А. И., Рыбкин Г. И. Поражающее действие ядерного взрыва. - М.: Воениздат, 1960.
10. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере Земли крупных метеоритных тел. - В кн.: Метеоритика вып.32, М.: Наука, 1973, с.73 - 89.
11. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита. - В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 115 - 137.
12. Мартынюк М. М. Роль фазового взрыва космического вещества в процессе разрушения метеоритов. - Там же, с. 168 - 177.
13. Маслов Е. В. К вопросу о высоте и мощности взрыва Тунгусского метеорита. - В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 103 - 112.
14. Пасечник И. П. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным. - В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 24 - 54.
15. Петров Г. И., Стулов В. П. Движение больших тел в атмосферах планет. Космические исследования, 1975, 13, вып. 4, с. 587 - 594.
16. Покровский Г. И. Взрыв. - М.: Недра, 1980.
17. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского вывала. - В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2, Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 40 - 61.
18. Цикулин М. А. Приближенная оценка параметров Тунгусского метеорита 1908 г. по картине разрушений лесного массива. - В кн.: Метеоритика, вып. 20, 1961.
19. Цикулин М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. - М.: Наука, 1969.
20. Scorer R.S. The dispersion of a pressure pulse in the atmosphere. Proc. Roy. Soc., 201, ser. A, 1950, № 1064, 137 - 157.