

ПРОБЛЕМА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА (СБОРНИК СТАТЕЙ)

К ВОПРОСУ О ВЫСОТЕ И МОЩНОСТИ ВЗРЫВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

Е. В. МАСЛОВ

На основании общей картины вывала леса, произведенного взрывом Тунгусского метеорита, можно попытаться оценить высоту и мощность эквивалентного взрыва. Наличие в центре вывала области хаотического повала леса и так называемого «телеграфного леса» (стоящий лес с обломанными ветками), а также отсутствие кратера указывают на то, что взрыв произошел на некоторой высоте.

Известно, что при углах падения ударной волны меньше 40° на твердую поверхность отражение носит акустический характер, т. е. угол падения равен углу отражения. При углах падения больше 40° и достаточно сильной ударной волне может наблюдаться нерегулярное отражение: отраженная волна догоняет падающую и эти две волны образуют около отражающей поверхности так называемую головную волну, которая характеризуется почти вертикальным фронтом [2]. Угол, с которого начинается нерегулярное отражение, зависит от величины избыточного давления в падающей волне [1]. От величины избыточного давления в падающей волне зависит также величина коэффициента отражения от поверхности земли. Иными словами, избыточное давление над твердой поверхностью зависит от величины избыточного давления в падающей волне и от ее угла падения. Если падающая волна очень слаба (акустический случай), то коэффициент отражения не зависит от угла падения и равен 2 [1, 2].

Произведем сначала очень грубую ориентировочную оценку высоты взрыва. Рассмотрим взрыв с акустическим приближением. Будем считать, что избыточное давление изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от точки взрыва, а коэффициент отражения от земли остается постоянным при изменении расстояния от эпицентра. При этом будем считать, что баллистическая волна намного меньше ударной и ею можно пренебречь, т. е. фронт падающей волны имеет сферическую форму. Так как вертикальная составляющая избыточного давления только обламывает сучья, а горизонтальная составляющая стремится свалить дерево, то вывал леса создается только горизонтальной составляющей избыточного давления.

Горизонтальная составляющая на поверхности земли с изменением угла падения от 0° до 90° растет от 0 до некоторого максимума и затем убывает снова до 0. Следовательно, горизонтальная составляющая избыточного давления дважды принимает одну и ту же величину. На некотором расстоянии от эпицентра r_t горизонтальная составляющая избыточного давления достигает такой величины, что может начать валить деревья, а на некотором расстоянии r_v вывал леса прекращается (рис. 1). Это позволяет считать, что горизонтальные составляющие избыточных давлений в точках t и v равны:

$$\Delta P_{T\text{гор}} = \Delta P_{\theta\text{гор}}. \quad (1)$$

Для горизонтальной составляющей избыточного давления получаем

$$\Delta P_{\text{гор}} = K \frac{1}{R^2} \sin \varphi, \quad (2)$$

где K — коэффициент, независящий от R и φ , которые в свою очередь выражаются через r и h в виде

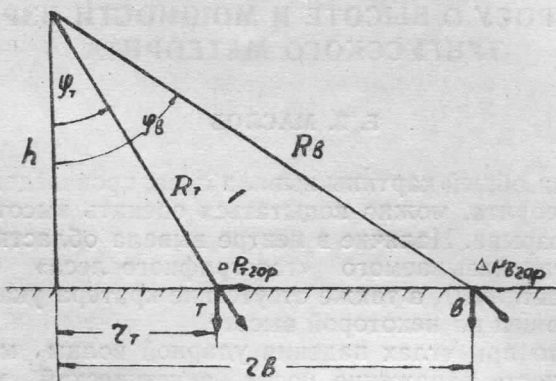


Рис. 1

$$R = \sqrt{h^2 + r^2}, \quad \sin \varphi = \frac{r}{\sqrt{h^2 + r^2}}. \quad (3)$$

Из (1) и (2) находим

$$\frac{\sin \varphi_T}{R_T^2} = \frac{\sin \varphi_\theta}{R_\theta^2} \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), находим

$$h = \sqrt{\frac{r_\theta^2 r_T^{2/3} - r_T^2 r_\theta^{2/3}}{r_\theta^{2/3} - r_T^{2/3}}}.$$

Метод акустического приближения завышает высоту взрыва, но зато дает ее порядок только по геометрической картине разрушения независимо от мощности взрыва. Точность определения высоты этим методом очень низка. Приняв ориентировочно радиус зоны „телеграфного леса“ равным $r_T = 3$ км, а радиус зоны вывала леса $r_\theta = 15$ км, получим высоту взрыва $h = 10$ км.

Оценим высоту и мощность взрыва более точным методом. Из зависимости $\Delta P_{\text{max}} = \psi_1(R)$ величины максимального избыточного давления ΔP_{max} в безграничной однородной атмосфере при нормальном давлении на уровне моря от расстояния R до точки взрыва для мощности в 1 мgt тротила (рис. 2) и зависимости $\Delta P_{\text{max}} = \psi_2(\Delta P_{\text{max}}, \varphi)$ максимального избыточного давления над отражающей поверхностью $\Delta P_{\text{max}}^{\text{отр}}$ от

величины максимального избыточного давления ΔP_{max} в падающей волне при различных углах падения φ (рис. 3)* находим величину горизонтальной составляющей избыточного давления $\Delta P_{\text{гор}}$ на поверхности земли.

* Рис. 3. (а и б) получен на основании графика на стр. 89 в [1].

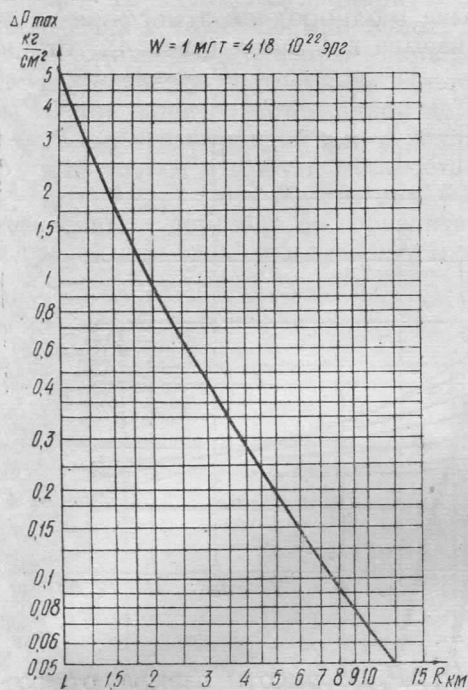


Рис. 2

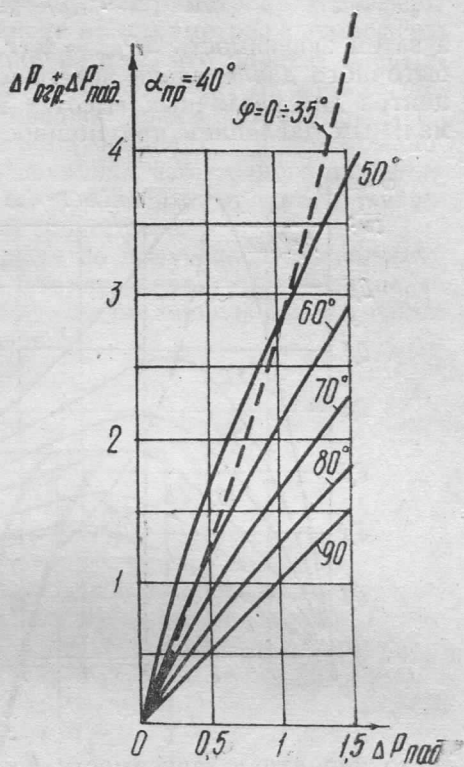


Рис. 3а

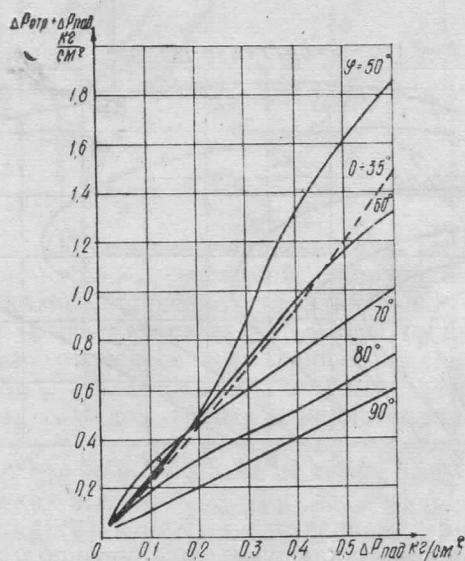


Рис. 3б

$$\Delta P_{\text{гор}} = \psi_2[\psi_1(R), \varphi] \sin \varphi,$$

а затем зависимость $\Delta P_{\text{гор}} = \psi_3(r, h)$ горизонтальной составляющей избыточного давления на поверхности земли от расстояния r до эпицентра для различных высот h взрыва в однородной атмосфере с нормальным давлением при мощности взрыва в 1 мвт (рис. 4), откуда

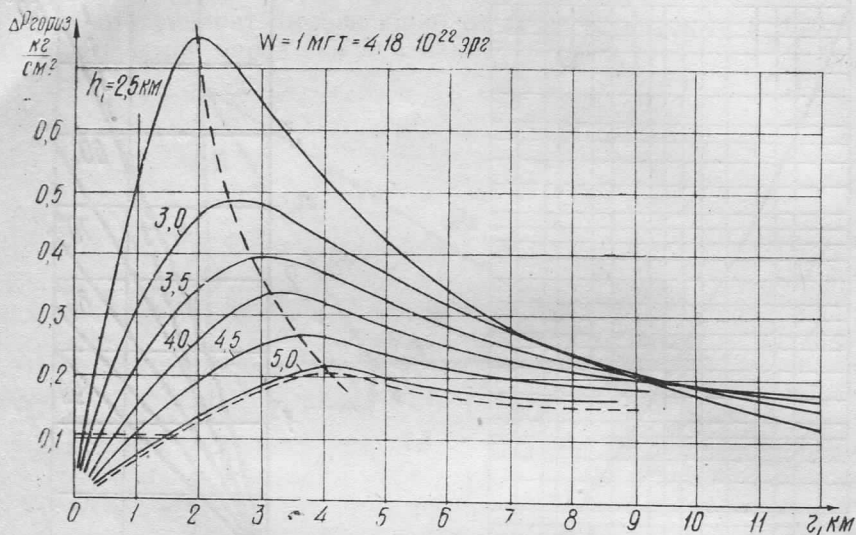


Рис. 4

легко перейти к зависимости $h = \psi_4(r, \Delta P_{\text{гор}})$ высоты взрыва от расстояния до эпицентра при различных величинах горизонтальных составляющих избыточных давлений на поверхности земли для взрыва мощностью в 1 мвт в однородной атмосфере с нормальным давлением на уровне моря (рис. 5). Для получения тех же избыточных дав-

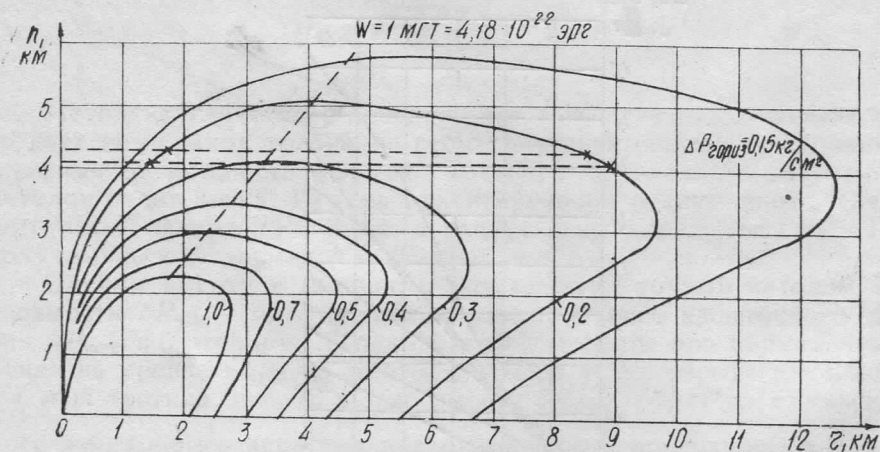


Рис. 5

лений при других мощностях взрыва следует пользоваться законом подобия

$$\left(\frac{W}{W_1} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{h}{h_1} = \frac{r}{r_1}.$$

Параметры ударной волны зависят только от параметров атмосферы в точке воздействия волны, но не зависят от параметров атмосферы в точке взрыва. Это положение основано на том, что процент энергии взрыва, переходящей в ударную волну, не зависит от параметров атмосферы в точке взрыва вплоть до низших слоев стратосферы [4] и что количество энергии в ударной волне в пределах данного телесного угла остается постоянным. Поэтому величина избыточного давления на уровне моря остается одной и той же независимо от того, произведен взрыв в однородной или в реальной тропосфере.

Определим высоту и мощность взрыва по полученной зависимости $h = \psi_4(r, \Delta P_{\text{гор}})$ (рис. 5). На рис. 6 представлена зависимость процента поваленных деревьев от горизонтальной составляющей избыточного давления для трех типов лесных массивов.

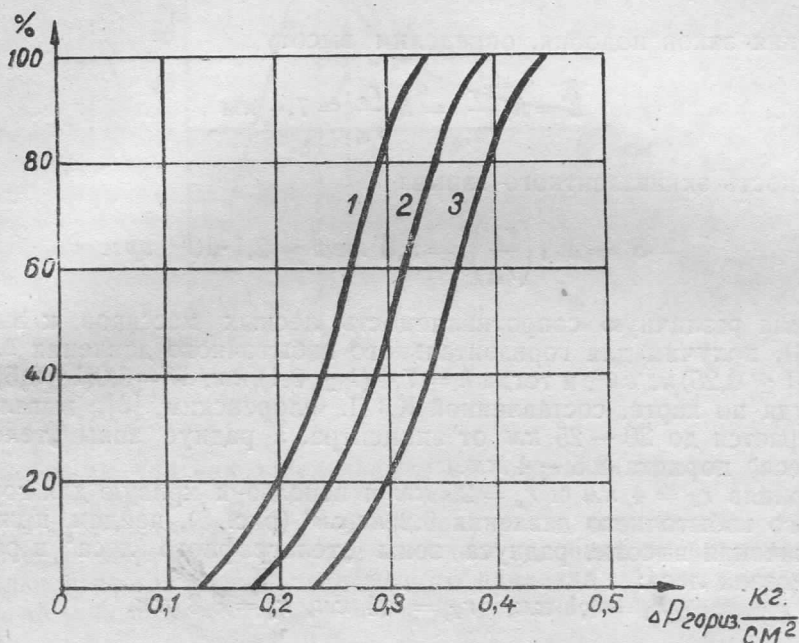


Рис. 6

К первому типу (1) отнесены лиственные и хвойные леса высокой полноты со слабой корневой системой, произрастающие на легких грунтах в благоприятных почвенно-климатических условиях без вмешательства человека. Высота деревьев 15—30 м, а диаметр стволов 5—50 см. К этому типу относятся леса с преобладанием березы и ели.

Ко второму типу (2) отнесены хвойные леса средней полноты, произрастающие на тяжелом грунте в неблагоприятных почвенно-климатических условиях и без вмешательства человека. Высота деревьев 5—20 м, а диаметр стволов 3—35 см. К этому типу относится таежный лес средних и высоких широт.

К третьему типу (3) отнесены лиственные и хвойные леса малой полноты с мощной корневой системой, произрастающие в благоприятных почвенно-климатических условиях при активном уходе за ними человека; высота деревьев 30—40 м, а диаметр стволов 30—65 см. К этому типу относятся сосновые, дубовые леса паркового типа.

Примем ориентировочно, как и выше, радиус «телеграфного леса» $r_T = 3$ км, а радиус вывала леса $r_g = 15$ км; будем считать, что r_T и r_g — радиусы 5-процентного повала деревьев. Из рис. 6 видно, что в таежном лесу 5-процентный повал деревьев соответствует горизонтальному избыточному давлению порядка $0,2$ кг/см².

Расстояния от эпицентра и высоты, соответствующие единичной мощности взрыва в 1 мвт, будем называть приведенными. Пользуясь кривой, для которой $\Delta P_{гор} = 0,2$ кг/см², из рис. 5 находим приведенную высоту взрыва h_1 , при которой отношение радиусов $\frac{r_T}{r_g}$ равно отношению приведенных радиусов $\frac{r_{T_1}}{r_{g_1}}$.

$$h_1 = 4,3 \text{ км}; \quad r_{T_1} = 1,75 \text{ км} \quad \text{и} \quad r_{g_1} = 8,6 \text{ км}.$$

Применяя закон подобия, определим высоту

$$h = h_1 \frac{r_T}{r_{T_1}} = h_1 \frac{r_g}{r_{g_1}} \approx 7,4 \text{ км}$$

и мощность эквивалентного взрыва

$$W = W_1 \left(\frac{r_g}{r_{g_1}} \right)^3 = 5,0 \text{ мвт} = 2,1 \cdot 10^{23} \text{ эрг}.$$

Учитывая различную сопротивляемость лесных массивов к вывалам (рис. 6), получим для горизонтального избыточного давления $\Delta P_{гор} = 0,2 (1 \pm 0,25)$ кг/см², и тогда $h = 7,4 (1 \pm 0,1)$ км, $W = 5,0 (1 \pm 0,5)$ мвт.

Судя по карте, составленной К. П. Флоренским [3], вывал леса простирается до 20 — 25 км от эпицентра, а радиус зоны «телеграфного леса» порядка 3,5 — 4 км.

Приняв $r_T = 4$ км и $r_g = 25$ км и используя кривую для горизонтального избыточного давления $0,2$ кг/см² (рис. 5), найдем приведенные значения высоты, радиуса зоны «телеграфного леса» и радиуса зоны вывала леса:

$$h_1 = 4,1 \text{ км}, \quad r_{T_1} = 1,4 \text{ км}, \quad r_{g_1} = 8,8 \text{ км}.$$

Из закона подобия находим высоту и мощность эквивалентного взрыва $h = 11,7$ км, $W = 23$ мвт $\approx 10^{24}$ эрг.

Оценим высоту и мощность взрыва, не прибегая к зависимости рис. 6. В результате обработки лесотаксационных данных экспедиции 1960 года в направлении на юг получена зависимость процента поваленных деревьев от расстояния до эпицентра, изображенная на рис. 7. Эта зависимость получена из расчета, что полнота леса неизменна и равна 750 стволам на гектар. Большой разброс точек можно объяснить тем, что в действительности в каждой точке лес имеет свою определенную полноту. Совместим кривую рис. 7 с кривой рис. 4, что сводится к определению масштабных коэффициентов для осей абсцисс и ординат. Кривая АВД (рис. 7) должна совпасть с одной из кривых рис. 4, т. е. точка А должна находиться на кривой максимумов (пунктир рис. 4), отношение $\frac{O_1 a_1}{O_1 b_1}$ (рис. 7) должно быть равным аналогичному

отношению абсцисс на рис. 4, а отношение $\frac{O_1 a_1}{O_1 b_1}$ должно быть равным

аналогичному отношению ординат на рис. 4. При выполнении этих трех условий можно считать кривые совмещенными. Заметим, что кривая рис. 7 при больших расстояниях от эпицентра (район точки Д) может иметь спад более резкий, чем кривые рис. 4. Этот вопрос рассмотрен ниже.

По совмещенным кривым определяем приведенную высоту взрыва h и приведенное расстояние до максимума вывала, а затем по закону подобия — высоту и эквивалентную мощность взрыва. Они будут более

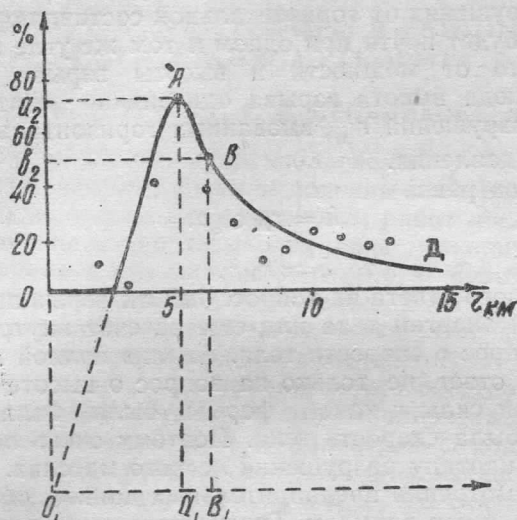


Рис. 7

достоверными, так как определяются на основании кривой, полученной непосредственно для местного типа леса.

Из совмещения кривых можно получить и зависимость процента поваленных деревьев в данных таежных условиях от величины горизонтальной составляющей избыточного давления. Нанеся эту зависимость на рис. 6, можно убедиться в достоверности полученных результатов.

Совместив кривую рис. 7 с одной из кривых рис. 4 (пунктир), найдем приведенную высоту взрыва $h_1 = 5,1$ км и приведенное расстояние до максимального вывала $r_{M_1} = 4$ км при реальном $r_M = 5$ км. Применяв закон подобия, вычислим высоту и мощность эквивалентного взрыва:

$$h = h_1 \frac{r_M}{r_{M_1}} = 6,4 \text{ км}, \quad W = W_1 \left(\frac{r_T}{r_{T_1}} \right)^3 = 2 \text{ мт} \approx 0,85 \cdot 10^{23} \text{ эрг.}$$

Полученные результаты следует считать заниженными вследствие того, что кривая рис. 7 отражает уменьшенное число поваленных деревьев, так как за прошедшие 50 лет после взрыва часть деревьев полностью сгнила, а сохранились только стволы наиболее крупных деревьев. Следовательно, высота эквивалентного взрыва должна быть более 6,5 км, а его мощность более 2 мт.

Характер зависимости процента поваленных деревьев от расстояния до эпицентра можно дополнить для большей достоверности зависимостью максимальных диаметров сломанных и вываленных деревьев от расстояния до эпицентра.

Высоту взрыва можно оценить следующим простым способом. Если определить углы, при которых возникают максимумы горизонтальных составляющих избыточных давлений, то увидим, что они лежат в узком интервале: при сильных избыточных давлениях $\alpha \approx 40^\circ$, при слабых — 50° . Таким образом, линия максимума горизонтальных составляющих избыточного давления (пунктир рис. 5) мало отличается от прямой. Это тем более будет верно в том узком диапазоне горизонтальных составляющих избыточного давления, при которых происходит вывал леса (от 0,1 до 0,45 кг/см², рис. 6). Это означает, что при воздушном взрыве максимум разрушения от горизонтальной составляющей избыточного давления всегда будет почти при одном и том же угле падения ударной волны независимо от мощности и высоты взрыва, а именно при $\alpha = 40^\circ - 50^\circ$. Отсюда высота взрыва однозначно связана с радиусом максимальных разрушений r_M , вызванных горизонтальной составляющей избыточного давления.

Высота взрыва равна

$$h = r_M \operatorname{ctg} \alpha.$$

Если принять $\alpha \approx 45^\circ$, то $h \approx r_M^*$.

Для правильного ответа на вопрос, был ли взрыв вызван только за счет кинетической энергии тела или еще за счет внутренней энергии, нужно решить вопрос о скорости тела. Анализ полной картины вывала леса может дать ответ не только на вопрос о высоте и мощности, но и на вопрос, какой силы и какой формы была баллистическая волна, т. е. какова была скорость тела. Поэтому очень важно получить наиболее полную картину разрушений лесного массива.

Итак, из рассмотрения предварительных данных об общей картине разрушений, вызванных взрывом Тунгусского метеорита, следует, что высота эквивалентного взрыва заключается в пределах от 6,5 до 11,5 км, а энергия — в пределах от 2,0 до 23 мвт, что составляет $(0,8 - 10) \cdot 10^{23}$ эрг. Расчеты эти следует считать предварительными. После того, как будут получены более точные данные о характере вывала леса, высота и мощность взрыва могут быть уточнены.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Иванов, Г. И. Рыбкин. Поражающее действие ядерного взрыва, Всениздат, 1960.
2. Действие ядерного оружия, перевод с англ., Воениздат, 1960.
3. В. Г. Фесенков, Е. Л. Кринов. Новое о Тунгусском метеорите, Вестник АН СССР, № 12, 1960.
4. А. С. Компаниец. Точечный взрыв в неоднородной атмосфере. ДАН СССР, т. 130, № 5, 1960, стр. 1001.

On the altitude and the power of Tungus meteorite explosion

E. V. Maslov

The picture of the forest-fall in the region of Tungus meteorite explosion is simply bound with the altitude and the power of explosion. According to preliminary informations about forest-fall in the region of Podkamennaya Tunguska the altitude of an equivalent explosion lies in the range of 6.5—11.5 km, with the energy of 2.0—23 megatons what makes $(0.8 - 10^{23})$ egr).

* Так как угол, при котором образуется максимум горизонтальной составляющей избыточного давления, не может быть меньше 39° , то, следовательно, высота взрыва не может превышать $h = 1,25 r_M$.