

УДК 551.596 + 552.6

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВИТИМСКОГО БОЛИДА 24.09.2002 г.

© 2004 г. Академик В. В. Адушкин, О. П. Попова, Ю. С. Рыбнов, В. И. Кудрявцев, А. Л. Мальцев, В. А. Харламов

Поступило 24.03.2004 г.

В данном сообщении приводятся результаты комплексных наблюдений за световыми, инфразвуковыми и сейсмическими возмущениями от пролета болида над средним течением реки Витим на расстоянии около 350 км на северо-северо-восток от озера Байкал.

Витимский болид был зарегистрирован оптическими и инфракрасными датчиками спутниковой системы наблюдений США 24.09.2002 г. в 16 : 48 : 56 UTC. Объект был обнаружен на высоте ~62 км в точке с координатами 57.91N, 112.90E и прослежен до высоты ~30 км с координатами 58.21N, 113.46E (рис. 1). Оптическим датчиком зарегистрирован световой сигнал болида с энергией в излучении порядка $8.6 \cdot 10^{11}$ Дж.

Используя методику оценки параметров болидов по световому импульсу [1], можно оценить начальную кинетическую энергию этого метеороида в $\sim 10^{13}$ Дж. Это соответствует энергии взрыва 2.4 кт ТНТ (1 кт = $4.2 \cdot 10^{12}$ Дж). Среди опубликованных за последние 15 лет данных о крупных метеорных телах оценка начальной кинетической энергии превышает $\sim 10^{13}$ Дж только у 10 событий.

Для таких крупных тел предположительно астероидного происхождения можно говорить о средней скорости входа в атмосферу порядка 20 км/с. В этом случае масса тела составляла примерно 50 т. Световые вспышки, регистрируемые спутниковой системой наблюдений, вызваны не только пролетом метеороида, но и его разрушением [1]. Наши оценки показывают, что основное выделение энергии, вероятно, произошло на высотах ниже 40 км (рис. 2). Движение крупных космических тел в атмосфере со сверхзвуковой скоростью сопровождается образованием ударной волны, подобной ударной волне цилиндрического взрыва. Для цилиндрического взрыва радиус акустического источника можно определить как [2]

$$\Lambda \approx \sqrt{\frac{E_0}{LP_h}}$$

где $E_0 \approx 10^{13}$ Дж – начальная кинетическая энергия, L – протяженность следа в км, P_h – атмосферное давление в Па на высоте источника. Длину следа, на которой происходит основное выделение энергии, можно оценить как $2H_0$, где H_0 – характеристическая высота атмосферы [3]. Для высот 30–60 км $H_0 \approx 7$ –8 км и $L \approx 14$ –16 км. Тогда радиус акустического источника цилиндрического взрыва $\Lambda \approx 460$ –550 м. Оценка по данным работы [3] дает масштаб $\Lambda \approx 460$ –470 м, что хорошо согласуется с нашими результатами.

В первом приближении набор фрагментов разрушающегося болида можно принять за сферическое тело диаметром d [1]. Тогда характерный размер возмущенной области, в которой происхо-

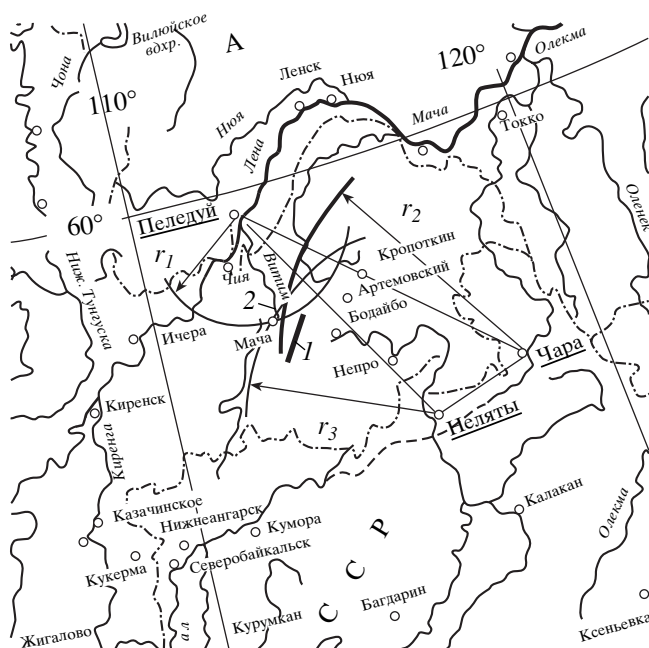


Рис. 1. Карта района события 24.09.2002 г.: 1 – траектория полета болида по данным ИСЗ; 2 – координаты максимального энерговыделения по данным регистрации сейсмических событий на станциях “Пеледуй”, “Чара” и “Неляты”; $r_1 = 142$ км., $r_2 = 357$ км, $r_3 = 276$ км.

Институт динамики геосфер
Российской Академии наук, Москва

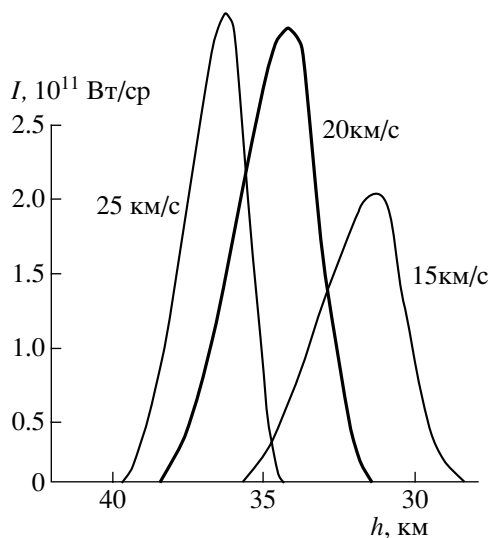


Рис. 2. Модельный световой импульс болида при различных скоростях входа в атмосферу.

дит основное энерговыделение болида, можно оценить как [2]

$$d \approx \frac{c}{V} \Lambda,$$

где c – скорость звука на высоте источника в м/с; V – скорость болида в м/с. В данном случае характерный размер возмущенной области оценивается в ~ 7.8 – 9.3 м.

Движение и разрушение крупных космических тел в атмосфере сопровождается мощными акустическими, инфразвуковыми и сейсмическими возмущениями, которые могут быть зарегистрированы наземными станциями.

Анализ вариаций атмосферного давления по записям барограмм метеостанций ряда стран при падении Тунгусского болида (1908 г.) был проведен в 20–30 гг. прошлого века [4]. Первая инструментальная регистрация акустических волн осуществлена 31.03.1965 г. при падении метеорита Ревелсток на юго-западе Канады. Систематическая инструментальная регистрация акустических волн, образующихся при пролете и падении метеороидов, началась только в 70-х годах. При этом регистрацию производили на расстояниях, не превышающих несколько сотен километров. Только в последнее время появились сообщения о регистрации акустико-гравитационных волн на расстояниях в тысячи километров [5].

Основным источником возмущений атмосферы является ударная волна. Звуковые возмущения распространяются в атмосфере на расстояния, не превышающие 2–2.5 высоты разрушения болида (зона прямой слышимости). Инфразвуковые возмущения распространяются в атмосферных волноводах, сформированных на различных

высотах градиентами температуры, скорости и направления ветра, на расстояния в сотни и тысячи километров. Ударная волна на расстояниях 1–2 Λ , уходящая вертикально вниз, переходит в звуковую волну и, достигая поверхности, возбуждает поверхностные сейсмические волны, которые регистрируются на расстояниях в сотни километров.

24.09.2002 г. сеймостанциями: “Чара” (56.9N, 118.27E), “Неляты” (56.49N, 115.7E) и “Пеледуй” (59.6N, 112.6E) зарегистрированы по два сигнала предположительно от рассматриваемого события. Зарегистрированные сейсмограммы и времена прихода сигналов представлены на рис. 3. Первые сигналы в каждом пункте, по-видимому, соответствуют приходу сейсмической волны из эпицентра события, которая возбуждается звуковой волной, распространяющейся от источника вертикально вниз, а вторые – воздействием на сейсмоприемник прямой инфразвуковой волны от источника, распространяющейся в приземном волноводе. Времена распространения сигналов от источника: $\Delta t_{s_1} = 144$ с, $\Delta t_{s_2} = 247$ с, $\Delta t_{s_3} = 221$ с и $\Delta t_{a_1} = 483$ с, $\Delta t_{a_2} = 1103$ с, $\Delta t_{a_3} = 908$ с (время события 16 : 48 : 56 UTC).

Можно записать уравнения, связывающие эти величины с неизвестными координатами источника (расстояниями от станций r_1, r_2, r_3 и высотой h) и скоростями сейсмических, и акустических (звуковых и инфразвуковых) волн

$$r_i(h) = \frac{\Delta t_i + \frac{h}{v_0(h)}}{\frac{1}{v_{a_i}(h)} - \frac{1}{v_{s_i}}} = v_{s_i} \left(\Delta t_{s_i} - \frac{h}{v_0(h)} \right)$$

Здесь $i = 1, 2, 3$; $\Delta t_i = \Delta t_{a_i} - \Delta t_{s_i}$; v_{s_i} – скорости сейсмических волн (считаются неизвестными). Скорости распространения звуковых $v_0(h)$ и инфразвуковых $v_{a_i}(h_s)$ волн рассчитаны путем построения соответствующих траекторий распространения акустических сигналов в атмосферных волноводах в зависимости от высоты источника h_s (точки разрушения болида). Использовалась стандартная стратификация атмосферы с учетом данных радиозондирования, предоставленных Гидрометцентром РФ.

Расчеты показывают, что болид разрушился на высоте приблизительно $h = 27$ км в окрестности точки с координатами (58.3N, 112.8E) в 30–40 км северо-западнее трассы пролета, зафиксированной американскими ИСЗ. Схема расчета координат точки разрушения болида по записям сеймостанций показана на рис. 1. Рассчитанная по методике [6] погрешность оценки координат, которая определяется в основном ошибками измерения времен вступления сигналов, составляет примерно 10 км.

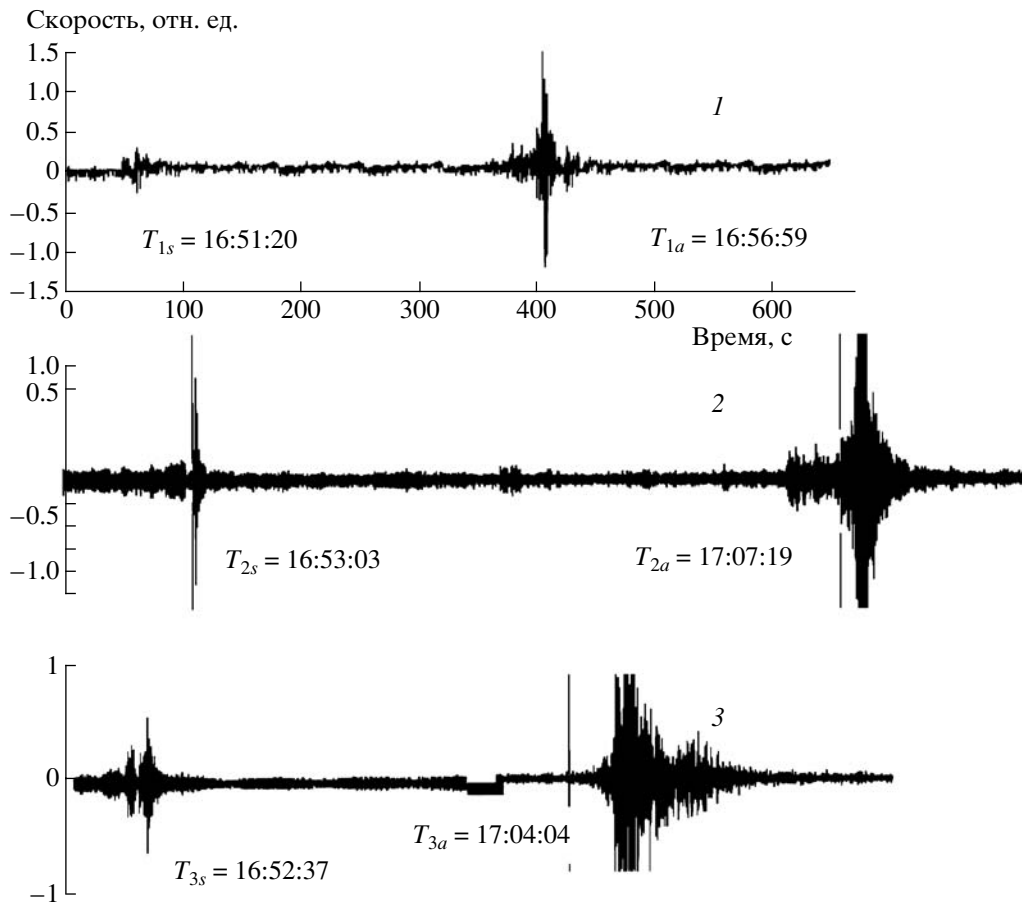


Рис. 3. Сейсмические сигналы от болида, зарегистрированные 24.09.2002 г. на сеймостанциях “Пеледуй” (1), “Чара” (2), “Неляты” (3); времена вступления сигналов связаны с последовательным приходом сейсмической и инфразвуковой волн.

При непрерывной регистрации инфразвуковых (ИЗ) сигналов станциями “Уссурийск”, “Залесово”, “Подольск” и др. 24.09.2002 г. были зафиксированы возмущения инфразвуковых полей, которые можно идентифицировать как сигналы от болида. Станции оснащены высокочувствительной микробарографической аппаратурой, предназначенной для измерения колебаний атмосферного давления в диапазоне частот 0.0015–0.5 Гц (по уровню 0.5). На рис. 4 показаны записи на станциях “Уссурийск” и “Подольск”. Времена вступления сигналов равны 18 : 40 и 19 : 55 UTC. Видно, что сигналы при сдвиге на величину запаздывания подобны (коэффициент корреляции равен 0.79) с максимумом спектра на частоте 0.002 Гц. Частоты в области максимума спектра зарегистрированных инфразвуковых сигналов близки к частоте Вьяйсяля-Брента, лежащей в диапазоне 0.0016–0.003 Гц [7]. Поэтому регистрация возмущений на этих частотах связана как с распространением от источника инфразвуковых, так и внутренних гравитационных волн. Проведем сравнение энер-

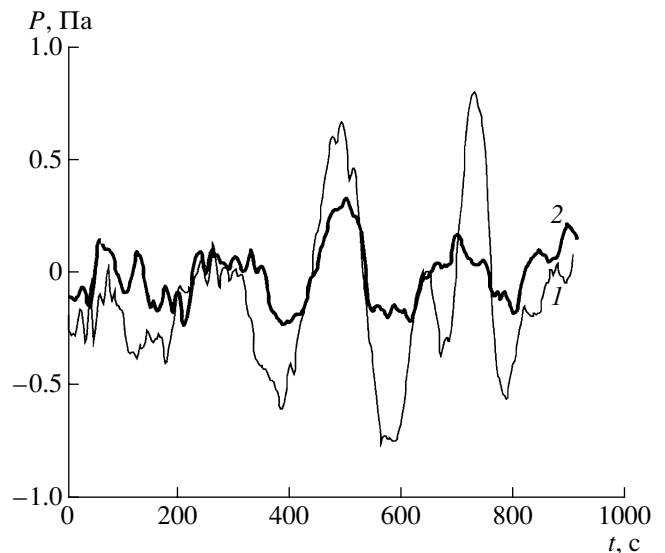


Рис. 4. Записи инфразвуковых возмущений, зарегистрированных 24.09.2002 г. станциями: “Уссурийск” в 18 : 40 UTC на расстоянии 2012 км (1) и “Подольск” в 19 : 55 UTC на расстоянии 4350 км (2).

гий, расходуемых на возбуждение внутренних гравитационных и инфразвуковых волн.

На возбуждение внутренних гравитационных волн расходуется [3]:

$$E_g \approx 1.3 \cdot 10^{-2} \frac{E_0^2 \exp \frac{L^2}{8H_0^2}}{\rho_{00} c^2 \Lambda^2 L} \approx 1.1 \cdot 10^{11} \text{ Дж},$$

где $E_0 \approx 10^{13}$ Дж – начальная кинетическая энергия, ρ_{00} – плотность воздуха на высоте максимального энерговыделения, кг/м³.

На возбуждение инфразвуковых волн расходуется [3]:

$$E_a \approx 5 \cdot 10^{-3} \frac{E_0^2}{\rho_{00} c^2 \Lambda^2 L} \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ Дж}.$$

Следовательно, болид возбуждал в атмосфере внутренние гравитационные волны почти на порядок интенсивнее инфразвуковых.

Для оценки начальной энергии болида по параметрам акустического сигнала использована зависимость [7]

$$E_0 \approx 27.16 \Delta P R \Lambda^2,$$

где ΔP – максимум амплитуды зарегистрированного сигнала, Па; R – расстояние от источника до точки регистрации, м.

Подставив $\Delta P \approx 0.75$ Па для станции “Уссурийск”, $R = 2012$ км, и $\Delta P \approx 0.33$ Па для станции “Подольск”, $R = 4350$ км (см рис. 4), получим оценку кинетической энергии болида в диапазоне $(0.8-1.3) \cdot 10^{13}$ Дж, что хорошо согласуется с оценкой по световому импульсу.

Комплексный анализ результатов регистрации сильных возмущений геофизических полей, вызванных Витимским болидом, позволил впервые получить оценку ряда его параметров. По сейсмоакустическим сигналам в ближней зоне определены высота и координаты его разрушения. По акустико-гравитационным волнам и световому импульсу определены начальная энергия болида и его размеры. Результаты данной работы позволяют сделать вывод: наземная сеть инфразвуковых и сейсмических станций в комплексе с ИСЗ может с достаточной надежностью осуществлять мониторинг за вторжением в атмосферу крупных метеорных тел.

Авторы выражают благодарность зав. отделом сейсмического мониторинга ЦОМЭ ГС РАН Л.С. Чепкунас и ее сотрудникам за предоставленные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nemthinov I.V., Svetlov V.V., Kosarev I.B., Popova O.P. et al. // Icarus. 1997. V. 130. № 2. С. 259–274.*
2. *Цикулин М.А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М.: Наука, 1969. 132 с.*
3. *Голицын Г.С., Григорьев Г.И., Докучаев В.П. // Изв. АН СССР. ФАО. 1977. Т. 13. С. 926–935.*
4. *Бронитэн В.А. Метеоры, метеориты, метеороиды. М.: Наука, 1987. 176 с.*
5. *Brown P., Spalding R.E., ReVelle D.O. et al. // Nature. 2002. V. 420. Iss. 6913. С. 294–296.*
6. *Харламов В.А., Рыбнов Ю.С. В сб.: Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли (геофизика сильных возмущений). М.: ИДГ РАН, 2002. С. 585–595.*
7. *Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере М.: Мир, 1978. 532 с.*