

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА ПО СПЕКТРУ МОЩНОСТИ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.С. Рыбнов, О.П. Попова, В.А. Харламов

В статье рассмотрены вопросы оценки энергии Челябинского болида по длиннопериодным инфразвуковым колебаниям атмосферного давления. Предложена методика, в которой используется интегральная зависимость энергии от спектра мощности. Полученные результаты достаточно удовлетворительно совпадают с данными, полученными в других работах.

Введение

Оценки энергии Челябинского болида посвящено большое количество работ. Так в [Pорова et al., 2013; Brown et al., 2013; Емельяненко и др., 2013; Рыбнов и др., 2013] на базе собранных и проанализированных инфразвуковых данных и данных

по разрушению остекления зданий энергия болида была оценена от 380 [Емельяненко и др., 2013] до 900 кт [Brown et al., 2013].

Инфразвуковые сигналы болидов, в том числе зарегистрированные станциями Международной системы мониторинга, исследовались в целом ряде работ, например в [Revelle, 1997; Edwards et al., 2006; Edwards, 2010; Silber et al., 2009; Ens et al., 2012; Stevens et al., 2006].

В этих работах показано, что характер волнового излучения зависит от количества выделенной в атмосферу энергии, ее распределения в атмосфере и параметров самой атмосферы. ReVelle (1997), Цикулин (1969) рассматривали возможность применения взрывной аналогии к оценке энергии болида, было показано, что на расстояниях порядка нескольких сотен километров инфразвуковые волны от космических тел по энергетическим характеристикам находятся в хорошем согласии с волнами от химических взрывов.

Анализ спектрограмм показал, что для источников взрывного типа в спектре сигналов наблюдается характерная частота $f_{\text{хар}}$, превалирующая над другими. Были разработаны функциональные зависимости [Stevens et al., 2006; Ens et al., 2012; Рыбнов и др., 2013] позволяющие оценивать энергию источника по характерной частоте. Погрешность оценок не превышает 2-х раз.

Для оценки энергии источника использовалась функциональная зависимость вида

$$\lg q \approx a - b \cdot \lg f - c \cdot \lg R + d, \quad (1)$$

где f – частота в Гц, R – расстояние в км. Значения коэффициентов a , b и c в уравнении получены путем построения регрессивных зависимостей методом наименьших квадратов и равны: $a \approx 0,65$, $b \approx 2,3$, $c \approx 0,49$. Влияние сезонных вариаций стратосферного ветра и азимута из источника на пункт регистрации учтены в виде добавки d к основной функциональной зависимости.

Функциональная зависимость (1) была получена на основании анализа волновых форм инфразвуковых возмущений в диапазоне частот $0,02 \div 0,3$ Гц. Объем выборки составил около 100 сигналов от взрывов, проведенных на высотах от $35q^{1/3}$ до 5000 м, где q – тротиловый эквивалент в кт [Stevens et al., 2006]. Сигналы регистрировались на эпицентральных расстояниях от 500 до 5000 км. Распределение числа взрывов от их энергии приведено на рис. 1. Как видно из рис. 1, основной вклад (до 68%) в оценку энергии источника по приведенной выше зависимости вносят взрывы мощностью $20 \div 150$ кт. Частотный диапазон инфразвуковых сиг-

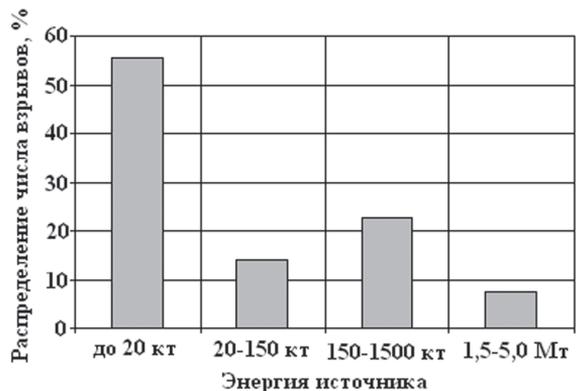


Рис. 1. Распределение взрывов, использовавшихся для получения функциональной зависимости (1), от их энергии

налов от взрывов такой мощности лежит в интервале от 0,3 ($q < 20$ кт) до 0,02 Гц ($q < 300$ кт). Поэтому оценки мощности, полученные по зависимости (1), применимы для источников, сигналы которых находятся в частотном диапазоне $0,02 \pm 0,3$ Гц.

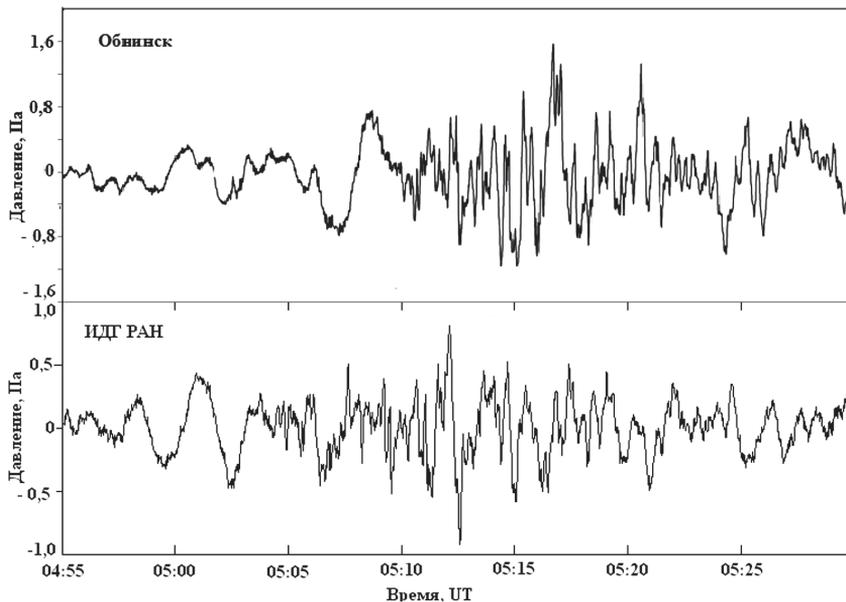


Рис. 2. Волновые формы сигналов, зарегистрированные в западном направлении

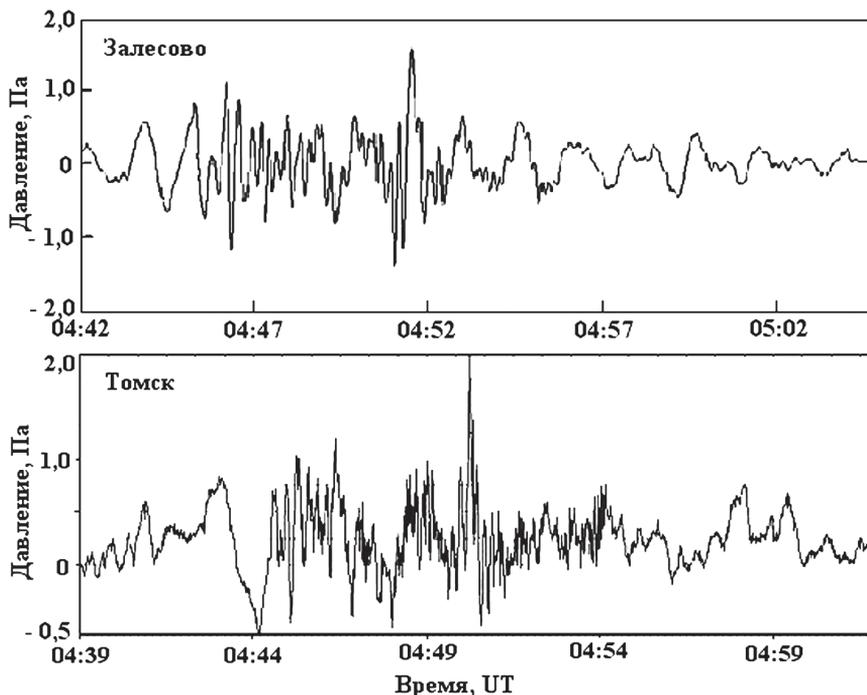


Рис. 3. Волновые формы сигналов, зарегистрированные в восточном направлении

Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления

По волновым формам сигналов, приведенных на рис. 2–3, и их спектрам (см. рисунки 4, 5) видно характерное низкочастотное вступление ($f \approx 0,005$ Гц) как для сигналов, распространяющихся в восточном, так и западном направлениях. Колебания с такими частотами являются первой нормальной частотой атмосферы и возбуждаются при достаточно мощных взрывах [Бреховских, 1957]. В реальной атмосфере волна от мощного взрыва «распадается» на группы волн, распространяющихся самостоятельно со своей скоростью [Бреховских, Лысанов, 1982; Блохинцев, 1981]. Это так называемые нормальные волны для волновода с переменной скоростью звука по высоте, частота которых может быть оценена как [Бреховских, Лысанов, 1982]

$$f_i = \frac{c \cdot (i + \frac{1}{2})}{2 \cdot z}$$

где z – высота стратосферы, i – номер волны.

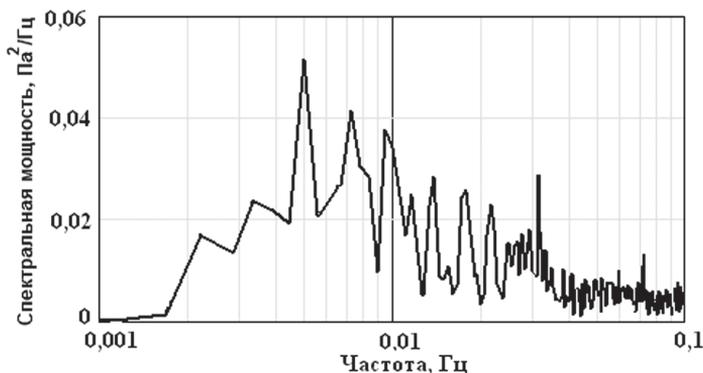


Рис. 4. Спектр сигнала зарегистрированного в ИДГ РАН.

Основные частоты: 0,005 Гц (200 с → 3,3 мин); 0,0072 Гц (139 с → 2,3 мин); 0,0094 Гц (106 с → 1,77 мин); 0,0139 Гц (72 с → 1,2 мин); 0,0178 Гц (56 с → 0,94 мин); 0,0217 Гц (46 с → 0,77 мин)

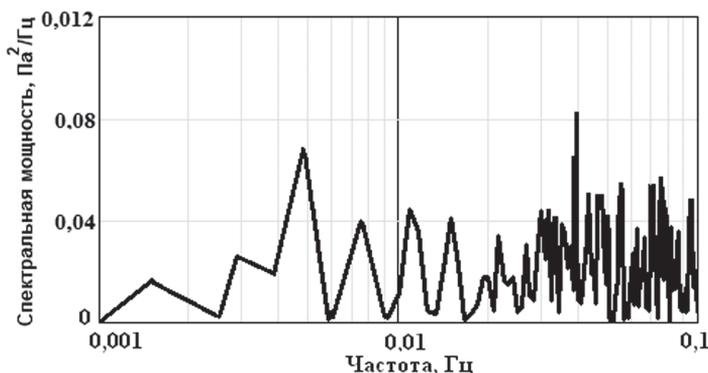


Рис. 5. Спектр сигнала зарегистрированного в Томске.

Основные частоты: 0,0049 Гц (204 с → 3,4 мин); 0,0075 Гц (133 с → 2,2 мин); 0,011 Гц (91 с → 1,5 мин); 0,015 Гц (67 с → 1,1 мин); 0,021 Гц (48 с → 0,8 мин)

В табл. 1 приведены значения частот первых пяти нормальных волн. Для сравнения в таблице приведены основные частоты, зарегистрированные в ИДГ РАН. Видно хорошее совпадение. Максимальная погрешность не превышает 18%, при среднем значении равном 8%.

Таблица 1

Номер волны	Расчет, частота/период	Измерения, частота/период
1	0,005 Гц/202 сек	0,005 Гц/202 сек
2	0,008 Гц/120 сек	0,0072 Гц/139 сек
3	0,012 Гц/87 сек	0,0094 Гц/106 сек
4	0,015 Гц/67 сек	0,0139 Гц/72 сек
5	0,018 Гц/55 сек	0,0178 Гц/56 сек

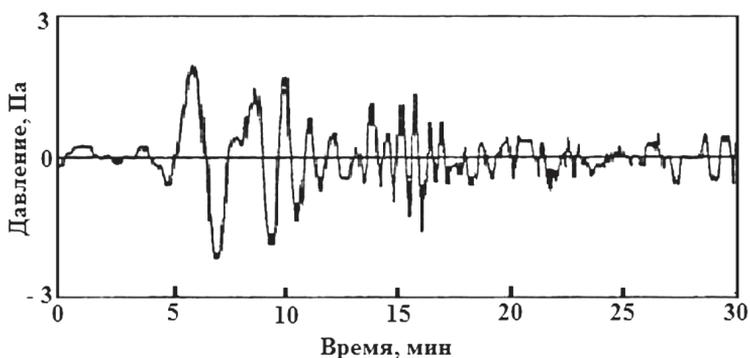


Рис. 6. Инфразвуковой сигнал от мощного взрыва ($q \approx 2,4$ Мт) в атмосфере на расстоянии ≈ 2400 км

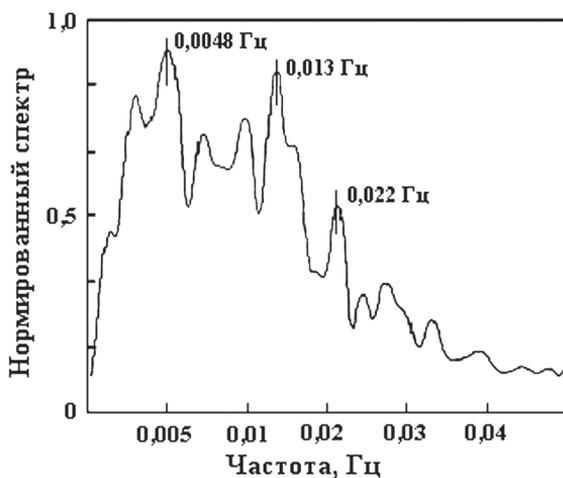


Рис. 7. Спектр инфразвукового сигнала от мощного взрыва

Пример такого сигнала, зарегистрированного на расстоянии 2400 км в восточном направлении от воздушного взрыва мощностью 2400 кт, приведен на рис. 6, а его спектр на рис. 7. Мощность такого взрыва, оцененная по (1), равна ≈ 1200 кт. Это может быть связано с тем, что его характерная частота лежит в более низкой области, чем та, для которой была получена зависимость (1). Оценка мощности источника по зависимостям типа (1), полученная в [Ens et al., 2012; Рыбнов, 2013] для длиннопериодных колебаний, может привести к большой погрешности. Поэтому предлагается другой подход к оценке мощности источника. Спектральный состав, регистрируемой при мощном энерговыделении акустической волны, является важнейшей ее характеристикой, поскольку при распространении на большие расстояния играют роль процессы, которые зависят от частоты (дисперсия, рассеяние, поглощение, отражение и др.) [Губкин, 1978].

Так, если на определенном расстоянии R спектр акустического сигнала от взрывного источника равен $S(\omega)$, то в рамках приближенной модели стратосферы, с учетом расстояния до источника, его высоты, давления в волне можно представить в виде следующего разложения в интеграл Фурье [Пеликовский и др., 1979; Голубев и др., 1986].

$$P(t) = R \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \cdot f(r, \omega, z, z_h) \cdot e^{-i\omega t} d\omega,$$

$$\varphi(r, \omega, z, z_h) = \frac{ik}{2} \int_{-\pi/2+i\infty}^{\pi/2-i\infty} \frac{[\exp(-bz_{\min}) + V_g \exp(bz_{\min})] \cdot \{\exp(bz_{\max}) + V_t \exp[-b(z_{\max} - 2 \cdot \Delta z)]\}}{1 - V_g V_t \exp(2bz_m)} \times$$

$$\times H_0^{(1)}(kr \sin \theta) \sin \theta \cdot d\theta, \quad (2)$$

где: $P(t)$ – давление, $S(\omega)$ – спектр сигнала, φ – функция источника, z – высота стратосферы; z_h – высота источника; $z_m \approx 50$ км – характерная высота верхней границы стратосферы; $k = \omega/c$ – волновое число; $b = ik \cos \theta$; θ – угол падения, V_g – коэффициент отражения от поверхности Земли, V_t – коэффициент отражения от верхней границы стратосферы; $z_{\min} = z - z_h$; $z_{\max} = z + z_h$; Δz – высота однородного слоя, $H_0^{(1)}(kr \sin \theta) \sin \theta \cdot d\theta$ – функция Ханкеля первого рода.

Таким образом, спектр зарегистрированного сигнала включает в себя информацию не только о параметрах источника (мощность, высота), но и о характеристике трассы распространения (расстояние, коэффициенты отражения).

Поэтому для оценки энергии источника предложено использовать интегральную зависимость энергии от спектра сигнала:

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi\rho c} \int_{\omega} S^2(\omega) \cdot d\omega, \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, c – скорость звука, $S(\omega)$ – спектр сигнала.

Суть методики заключается в следующем. Были выбраны сигналы от источников с q от 330 до 2400 кТ на расстояниях 1700–3500 км (всего 24 сигнала). Вычисленные спектры нормировались на величину $\sqrt[3]{E_0}$, где E_0 – энергия источника в кт. На рис. 8 показан усредненный приведенный спектр для источников с тротильным эквивалентом в диапазоне от 330 до 2400 кт. По оси абсцисс отложена величина $\omega \cdot \sqrt[3]{E_0}$, а по оси ординат – отношение спектральной энергии на каждой частоте к полной энергии по всему спектру, так что площадь под кривой равна единице. Максимум распределения приходится в среднем на $\omega \cdot \sqrt[3]{E_0} \approx 0,4$. Тогда энергию источника можно будет оценить как

$$E_0 = (0,4/\omega)^3 = (0,4/2\pi \cdot f_{\max})^3 \approx (0,064/f_{\max})^3 \quad (6)$$

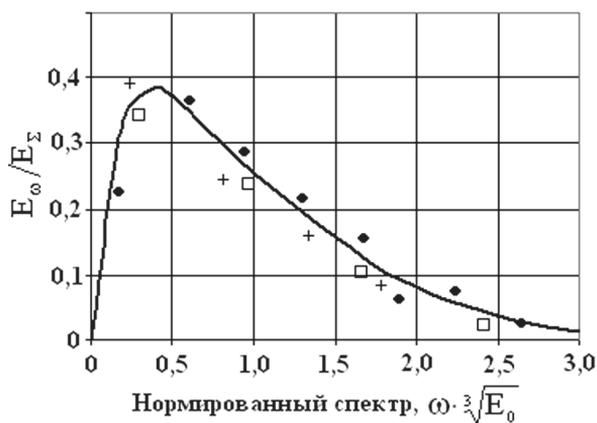


Рис. 8. Нормированный спектр инфразвуковых сигналов (● – $q = 330$ кт; + – $q = 1400$ кт; □ – $q = 2400$ кт)

Оценим по данной методике энергию взрыва, спектр которого приведен на рис. 7. Энергия составит 2330 кт, что хорошо совпадает с ее реальным значением. Оценка энергии Челябинского болида по данной методике равна ≈ 2000 кт, учитывая различие между ядерными и химическими взрывами в 2 раза по эквиваленту [Reed, 1972; Губкин, 1969] это соответствует примерно энергии ≈ 1000 кт. Такая оценка отличается в большую сторону по сравнению с оценками, приведенными в работах [Pороva et al., 2013; Рыбнов и др., 2013], где верхняя оценка энергии равна ≈ 720 кт, но близка к верхней границе оценки, приведенной в [Brown, 2013] ~ 900 кт.

В Рыбнов и др. (2013) и Pороva et al. (2013) также были сделаны оценки по экспериментальным зависимостям, связывающим характерную частоту спектра $f_{\text{хар}}$ с энергией источника. Но те зависимости были получены для другого диапазона частот, который не включал собственные частоты атмосферы, и поэтому не могут быть использованы для оценки по длиннопериодным колебаниям. Длиннопериодные колебания ($\approx 100\div 200$ с) характерны для источников большой мощности (>300 кт), которые возбуждают собственные колебания атмосферного волновода.

Заключение

В работе предложен новый подход к оценке энергии источника взрывного типа по инфразвуковым измерениям. Из волновых форм зарегистрированных сигналов видны характерные низкочастотные колебания как для сигналов, распространяющихся в восточном, так и западном направлениях. Колебания с такими частотами возбуждаются на первых собственных частотах атмосферы при наличии мощного источника энергии.

Спектр инфразвуковых сигналов включает в себя информацию не только о параметрах источника (мощность, высота), но и о характеристике трассы распространения (расстояние, коэффициенты отражения). Поэтому для оценки энергии источника предложено использовать интегральную зависимость энергии от спектра мощности сигнала.

Была разработана методика, которая тестировалась по базе данных. Для проверки использовались данные по волновым формам и спектрам от взрывов мощно-

стью от 330 до 2400 кт на расстояниях 1700–3500 км. Получено хорошее совпадение оценок с реальной мощностью взрыва. По разработанной методике была оценена энергия Челябинского болида равная ≈ 1000 кт. Полученная оценка несколько завышена по сравнению с данными, приведенными в [Pорова et al., 2013] и в других работах [например Brown, 2013; Емельяненко и др., 2013]. Такое расхождение требует дальнейших исследований.

Литература

- Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды / М.: Наука, 1981. 207 с.
- Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Изд. АН СССР, 1957. 502 с.
- Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 264 с.
- Голубев В.Н., Орлов Е.Ф., Петухов Ю.В.* Спектральные характеристики импульсных сигналов многократно отраженных от слоистого дна и поверхности океана / Акуст. журнал, № 4, т. 32, 1986. С. 462–467.
- Губкин К.Е.* О подобии взрыва // ФАО АН СССР, № 10, 1978. С. 49–60.
- Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др.* Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. / Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277.
- Пелиновский Е.Н., Петухов Ю.В., Фридман В.Е.* Приближенные уравнения распространения мощных акустических сигналов в океане / Изв. АН СССР. ФАО, № 4, т. 15, 1979. С. 436–444.
- Петухов Ю.В., Фридман В.Е.* Распространение взрывных волн в стратифицированном океане / Изв. АН СССР. ФАО, № 12, т. 15, 1979. С. 1307–1315.
- Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А. и др.* Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2013. С. 21–32.
- Цикулин М.А.* Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел // Изд. «Наука», Москва, 1969. 86 с.
- Brown PG and 32 co-authors* (2013) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. Nature 503: 238–241.
- Edwards W.N.* Meteor generated infrasound: theory and observation. In: Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. Le Pichon, A., Blanc, E., Hauchecorne, A. (Eds.), Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 361–414 (2010).
- Ens T.A., Brown P.G., Edwards W.N., Silber E.A.* Infrasound production by bolides: A global statistical study // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 80, 208–229 (2012).
- Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Reed J.W.* Atmospheric attenuation of explosion waves / J. Acoust. Soc. Amer, 1977, v. 61, № 1. P. 39–47.
- ReVelle D.O.* Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. In: Annals of the New York academy of sciences, near-earth objects – the United Nations international conference, Remo J.L. (ed.), New York Academy of Sciences, 822, 284–302 (1997).
- Silber E., ReVelle D.O., Brown P., Edwards W.* (2009) An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements. JGR, V. 114, E 08006.
- Stevens J.L., Adams D.A., Baker G.E., Xu H., Murphy J.R., Divnov I., Bourchik V.N.* (2006) Infrasound Modeling Using Soviet Explosion Data and Instrument Design Criteria from Experiments and Simulations // Technical Report ADA446517S.