

# Сейсмическая регистрация взрыва в атмосфере суперболида и его геофизические параметры

Коновалова Н.А., Алимов О.А., Калашникова Т.М.

Институт астрофизики Академии наук Республики Таджикистан

nakonovalova@mail.ru

Полет болидов и суперболидов в атмосфере Земли сопровождается образованием ударных волн, которые обеспечивают очень важную информацию (время прибытия, азимут и амплитуду), чтобы изучать физику метеорного явления. Данные о времени прибытия и азимут позволяют определять атмосферные траектории болидов, с другой стороны, по амплитуде волны можно определить динамику абляции и размер метеороида. Инфразвуковые и сейсмические наблюдения – одни из инструментальных методов обнаружения ударной волны болида. Современные цифровые сейсмические сети, созданные для обнаружения сейсмической волны, сгенерированной землетрясениями, могут также зарегистрировать сейсмическую волну, сгенерированную ударной волной болида и достигшей поверхности земли. Более ста лет назад, впервые сейсмографы Сибири и зарубежных сейсмостанций зарегистрировали сейсмическую волну, сгенерированную исключительным по своему масштабу Тунгусским феноменом. Уже тогда природа таких сейсмических волн была разгадана и результаты их обработки и анализа существенно способствовали изучению Тунгусского феномена. В настоящее время использование данных сейсмической регистрации болидов и суперболидов в совокупности с данными световой и инфразвуковой регистрации является установившейся практикой научного исследования, которая позволяет получить ценную информацию о взаимодействии метеорито-образующих метеороидов с атмосферой Земли, атмосферной траектории полета болида и координатах места возможного падения метеорита.

При вторжении крупного, метрового и декаметрового размера метеороида в атмосферу Земли генерируются акустические волны в форме фронта ударной волны цилиндрической формы, которая затем приводит к вспышке болида взрывного характера. Локализация взрыва и фрагментации болида в атмосфере может быть точно определена в четырех измерениях (три пространственных + временное), используя время прибытия сейсмических и акустических волн, записанных сейсмографами и инфразвуковыми станциями на земле. Когда прямое акустическое и сейсмическое прибытие идентифицировано для события болида, положение точки взрыва, геометрия траектории и информация о скорости могут быть определены и использованы для вычисления координат места падения метеорита. Сейсмические и акустические записи могут также дать достаточно информации для определения орбиты болидов в Солнечной системе, для чего разработаны два метода, использующих время прибытия ударных волн, зафиксированное сейсмическими станциями [1].

Первый - аналитический метод анализа, основан на предположении, что траектория болида прямая, а скорость болида и скорость звука постоянные. Неизвестными параметрами являются азимут  $A$  и угол  $Z$  наклона траектории болида, координаты пересечения траектории с земной поверхностью и время пересечения  $t_0$ . Решение находится итеративным путем, используя метод наименьших квадратов. Этот метод был применен к болидам, зарегистрированным в США (Арканзас), Япония (Miyako и Kanto) и Чешская Республика (Moravka).

Второй - графический метод анализа, основан на чертеже контуров времени прибытия волн. Умозрительно, контуры должны быть эллиптическими для ударных волн болидов.

Если расположение сейсмических станций подходящее, азимут траектории болида определяется по оси симметрии контуров, тогда как угол склонения оценивается по размеру контура. Применение методов к трем выше перечисленным болидам показало, что различие параметров, определенных обоими методами, находится в пределах нескольких градусов.

23 июля 2008 г., через несколько минут после захода Солнца в Таджикистане наблюдался суперболид и его ярчайшая вспышка, которая по своей энергетике на порядок слабее Уральского суперболида, наблюдавшегося 15 февраля 2013 г. Для наблюдавшегося над Таджикистаном суперболида была получена комплексная регистрация светового и сейсмического возмущения, сгенерированного его полетом и взрывом в атмосфере Земли. Сейсмический сигнал был записан измерительными сейсмометрами одной аналоговой и четырьмя цифровыми широкополосными сейсмическими станциями Геофизической службы АН Республики Таджикистан [2,3]. Оптическими датчиками спутника NASA была зарегистрирована энергия, выделившаяся во вспышке болида, около  $2 \cdot 10^{11}$  Дж, что эквивалентно 0.05 килотоннам ТНТ [4].

За последние 20 лет регистрации болидов и суперболидов различными системами наблюдения только в 15 случаях из около 30 зарегистрированных были получены, помимо оптических, также и сейсмические данные, которые были использованы для более детального и полного анализа с целью определения атмосферной траектории болида. Проведенный статистический анализ имеющихся в литературных источниках инфразвуковых и сейсмических данных о болидах свидетельствует, что уже при реализованной энергии, эквивалентной  $\geq 0.02 \div 0.03$  килотоннам ТНТ, при взрыве болида ударная волна формирует акустические и сейсмические волны. В табл. 1. для болидов, зарегистрированных сейсмическими и инфразвуковыми станциями, приведены сведения об энергии, выделившейся во взрыве болида, энергетическом классе и магнитуде сейсмического сигнала.

Таблица 1. Магнитуда и энергия сейсмического сигнала, сгенерированного взрывами метеорито-образующих болидов

Болид	Год	Тип	Энергия (J)	Энергия (кТ)	Класс	Магнитуда
Tagish Lake	2000	CM2	$1.1 \times 10^{12}$	0.26	9.0	2.8
Neuschwanstein	2000	EL6	$0.9 \times 10^{11}$	0.021	8.3	2.4
Park Forest	2003	L5	$2.1 \times 10^{12}$	0.5	9.2	2.9
Carancas	2007	H4-5	$1.3 \times 10^{11}$	0.03	8.4	2.5
Buzzard	2008	H4	$1.3 \times 10^{12}$	0.32	9.1	2.8
Sent-Robert	1994	H5	$1.3 \times 10^{11}$	0.03	8.4	2.5
Almahata Sitta	2008	Ureilite	$6.7 \times 10^{12}$	1.6	9.6	3.1
July 23, 2008	2008	-	$2.1 \times 10^{11}$	0.05	8.5	2.5

Во время события болида 23 июля 2008 г. в Таджикистане функционировали 5 цифровых сейсмостанций – “Чуянгарон”, “Гезан”, “Игрон”, “Гарм” и “Шаартуз”. На записях четырех сейсмостанций “Гарм”, “Гезан”, “Игрон” и “Чуянгарон” была обнаружена регистрация сейсмосигналов, соответствующих моменту пролета суперболида и не относящихся к регистрации какого-либо землетрясения. В табл. 2 приведены сведения о сейсмостанциях, зарегистрировавших сигнал от суперболида 23 июля 2008 г. (Таджикистан). В результате проведенной обработки сейсмических данных были идентифицированы несколько типов волн, наиболее видимых на тех станциях, которые расположены ближе к траектории болида и на которых время прибытия сигнала хорошо разделено. Для каждой станции определено время прибытия различных типов волн, сгенерированных взрывом болида, и

расстояние до проекции на земную поверхность точки на траектории болида, где произошел взрыв [5]. Полученные данные приведены в табл. 3.

Таблица 2. Сведения о сейсмостанциях, зарегистрировавших сигнал от суперболида 23 июля 2008 г (Таджикистан)

Название станции	Широта (°N)	Долгота (°E)	Высота н.у. моря (м)
Гарм	39.00	70.3160	1 305
Гезан	39.2833	67.7155	1 485
Игрон	38.2203	69.3266	1 284
Чуянгарон	38.6569	69.1582	1 049

Таблица 3. Время прибытия сигнала на разных станциях и их расстояние до точки регистрации

Название станции	Расстояние до точки фоторегистрации, (км)	Время прихода волн сейсмического сигнала, ч. м. с.	Время прихода волн акустического сигнала, ч. м. с.
Чуянгарон	105	14:44:12.1039	14:48:14.8369
Игрон	126	14:45:26.0877	14:48:53.5208
Гезан	90	14:44:31.5979	14:48:58.8562
Гарм	213	14:46:37.2796	14:50:01.1137

На всех станциях первое прибытие – это поверхностные р-волны. Самый сильный сигнал связан с прибытием позже прямых воздушных волн. Эти волны первыми прибывают от ближайшей к станции точки на траектории болида. На сейсмограммах начало прямых воздушных волн всегда очень резкое и они отчетливо различимы в фильтрованном сигнале. Зарегистрированные сейсмические сигналы на всех четырех станциях относятся к категории слабых. Для надежного выделения сеймосигнала от болида из фона шумов применялась частотная фильтрация. На рис. 1 приведена сейсмограмма сигнала от болида, зарегистрированного на сеймостанции “Чуянгарон”, на которой видно, что даже без фильтрации четко прослеживаются сейсмический и акустический сигналы с интервалом времени 3-4 минуты. Эти сигналы также хорошо просматриваются на записях станции “Гарм”, менее видны на станциях “Гезан” и “Игрон”.

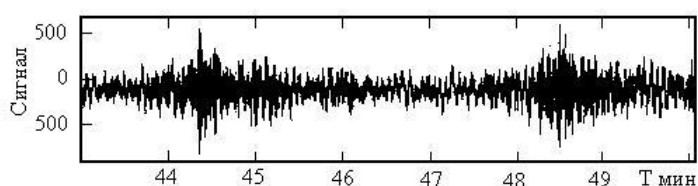


Рис. 1. Запись сейсмического сигнала без фильтра от болида 23 июля 2008 г., зарегистрированного на сеймостанции “Чуянгарон”

Согласно амплитуде зарегистрированного сейсмосигнала, можно определить, что выделившаяся сейсмическая энергия, сгенерированная взрывом болида, соответствует энергии землетрясения с энергетическим классом 8.5, что (без применения фильтра) соответствует магнитуде  $M = 2.5$ . Согласно проведенного анализа статистических данных о суперболидах и болидах, представленных в табл. 1, можно заключить, что суперболид 23 июля 2008 г. относится к средней категории суперболидов по сейсмическому энергетическому классу.

## Литература

1. *Brown P.G., Kalenda P. et al.* // Meteoritics and Planetary Science. – 2003. – №7. – P. 989-1003.
2. *Негматуллаев С.Х., Девонашоев А. Ю., Мирбаева З.Д.* // Сб. статей науч.-практ. конференции агентства “Точиккоинот”. – Душанбе, 2006. – С. 11-25.
3. Волновые записи цифровых широкополосных сейсмических станций Геофизической службы АН РТ // Фонды ГС АН РТ.
4. *Brown P.G.* <http://meteor.uwo.ca/research/fireball/usaf/sandia28001.pdf>
5. *Коновалова Н.А., Рислинг Л.И., Улубиева Т.Р.* // ДАН РТ. – 2011. - Т. 54. - №8. – С. 638-642.

## Seismic detection of superbolide explosion in the atmosphere

*Konovalova N.A., Alimov O.A., Kalashnikova T.M.*

*Institute of Astrophysics Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*

On July 23, 2008 at 14:45 UT, many eyewitnesses observed in the sky of Tajikistan a rear phenomenon, a bright bolide and its dust train, colored by the beams of the setting sun. Flash brightness from the explosion had the magnitude of -20.7. According to the pictures from the superbolide dust train at the explosion height, trail drift velocity in the atmosphere was obtained; it was 17.6 m/s in the southern direction. On the basis of geographical coordinates of flash projection on the Earth surface, obtained by an optical system of NASA satellite, the superbolide explosion height was determined, it was about 35 km. At Gissar analogous seismostation and at 4 digital seismo-stations of the Geophysical Service of Academy of Sciences of Tajikistan Republic, located at the distances from 45 to 210 km from the event epicenter, a seismic signal with the magnitude of about 2.5, generated by a superbolide explosion in the atmosphere, was registered. Superbolide explosions in the atmosphere with the energies exceeding 0.03 kiloton of trinitrotoluol equivalent have already been registered at current digital station. The distances, when such registration is possible, is of several thousand of kilometers, as it was shown by the event on February 15, 2013, associated with the great Ural meteorite. Stations of Tajikistan seismic network received the signal with the magnitude of more than 3 from the explosion in the atmosphere of the Ural meteorite 12 minutes after it.