

## ИНФРАЗВУКОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

А.Г. Сорокин

### INFRASONIC RADIATION OF CHELYABINSK METEOROID

A.G. Sorokin

В работе приводятся сведения о падении метеороида в районе Челябинска 15 февраля 2013 г. Описаны подобные инфразвуковые эффекты, зарегистрированные ранее, и методы их интерпретации. Даются характеристики инфразвуковой установки ИСЗФ СО РАН, на которой зарегистрирован эффект взрыва метеороида в атмосфере. Приводится характерный вид когерентного инфразвукового сигнала, обсуждаются его параметры.

*Ключевые слова:* атмосфера Земли, инфразвуковой сигнал, метеороид, регистрация инфразвука, энергия взрыва метеороида.

The study presents the information about the Chelyabinsk meteoroid fall on 15 February 2013. Similar infrasonic effects registered earlier as well as ways for their interpretation are described. Characteristics of ISTP SB RAS infrasonic facility at which the effect of meteoroid explosion in the atmosphere has been recorded are given. The typical form of the coherent infrasonic signal is shown, and its parameters are discussed.

*Key words:* the Earth's atmosphere, infrasonic signal, meteoroid, infrasound recording, meteoroid explosion energy.

#### Введение

Трудно себе представить, что немногим более двухсот лет назад гипотеза о космическом происхождении метеороидов считалась неправдоподобной. Так, академик Петербургской академии наук Паллас во время путешествия по Сибири обнаружил в Красноярске удивительную глыбу, состоящую из железа и камня. Немного позже, в 1799 г., немецкий ученый Э. Хладни, чл.-к. Петербургской академии наук, впервые правильно объяснил происхождение этой глыбы, представив теорию космического происхождения метеороидов и их возгорания при попадании в земную атмосферу. В настоящее время известно, что на Землю падает несколько тонн метеороидного вещества каждые сутки и около 2 тыс. т ежегодно [Brown et al., 2002; Мезенин, 1972]. Вместе с тем падение крупных метеороидов может представлять серьезную опасность, поскольку при достаточно больших размерах (порядка 50 м) энергия, выделяемая метеороидом при столкновении с земной атмосферой, может быть сопоставима с энергией атомного взрыва. Поэтому чрезвычайно важна любая информация о времени появления космического тела, его плотности и составе, возможных траекториях его движения, характеристиках его фрагментации и т. д.

#### Исследование акустических эффектов метеороидов в России и за рубежом

Истекшее столетие было знаменательно событиями, связанными с вторжением в атмосферу Земли крупных космических тел – метеороидов. Наиболее значимым по атмосферным эффектам среди них, безусловно, является Тунгусский метеороид 1908 г. [Кринов, 1949]. Акустическая волна от взрыва метеороида в нижних слоях атмосферы несколько раз обогнула земной шар. Несмотря на то, что падение метеороидов приходится в основном на безлюдные районы, вероятность катастрофических последствий остается высокой. Для сравнения в таблице приведены параметры некоторых наиболее крупных метеороидов, наблюдавшихся на территории России в XX в. Здесь представлены космические тела двух типов: к первому типу относятся метеороиды, при падении ко-

торых не обнаружено остатков вещества (Тунгусский метеороид); ко второму – метеороиды, при падении которых обнаружено вещество (Челябинский метеороид). Приведенные данные (см. таблицу) показывают, что Челябинский метеороид относится к событиям, сравнимым с Тунгусским метеороидом 1908 г.

Наиболее полные теоретические оценки атмосферных эффектов, вызываемых сверхзвуковым полетом метеороида в атмосфере Земли, были выполнены в 70-х гг. прошедшего века. В работе [Revelle, 1976] проведен анализ генерации и распространения волн давления при входе метеороида в атмосферу Земли на примере четырех событий, представленных в [Goerke, 1966; Shoemaker, Lowery, 1967; Woodward, Goerke, 1967]. Определена возможная область источника звука для предполагаемого диапазона параметров метеороидов. Модель волн давления в газовой среде, образованных метеороидом, в виде цилиндрического взрыва сформулирована с использованием теории подобия. Найдено, что действие сильного удара взрывной волны ограничено цилиндрической областью с радиусом  $R_0$ , пропорционально числу Маха и диаметру метеороида. Рефракция и поглощение были учтены приближенно. Для метеороидов с  $R_0 < 10$  м определена область высот источника. Для источников с  $10 < R_0 < 100$  м предсказаны преобладающие периоды (0.4–2.5 с) акустических волн. Даны оценки кинетической энергии метеороида в диапазоне  $10^{17}$ – $10^{22}$  эрг.

Исследование [Edwards et al., 2006] посвящено разработке и уточнению существующих эмпирических соотношений, связывающих амплитуды инфразвуковых волн от крупных взрывов, наблюдающихся в дальнем поле, с их кинетической энергией. В этой работе на большом объеме данных были получены более точные эмпирические соотношения, в том числе исследованы статистические свойства инфразвуковых сигналов как функции атмосферных ветров. Затем эти соотношения применялись при исследовании более ранних событий, связанных с метеороидами.

Наиболее общее эмпирическое соотношение между периодом акустических волн и энергией источника

Название события	Тунгусский метеорит	Сихоте-Алинский метеороид	Витимский болид	Челябинский метеороид
Дата и время события, UT	17(30).06. 1908 0:14.5	12.02.1947 0:38	24.09.2002 16:50	15.02.2013 3:20
Высота взрыва, км	7–10	25	30	15–25
Масса, т	Не установлена	100	160	7000
Состав	Не определен	94 % железо	Не определен	Хондриты
Энергия, мегатонн (ТНТ)	50	0.01	0.2	до 0.5
Источник информации	<a href="http://ru.wikipedia.org">http://ru.wikipedia.org</a>			

было разработано для Американского военно-воздушного центра технических приложений (AFTAC) [Revelle, 1997]:

$$\log(W / 2) = 3.34\log T - 2.58 \text{ для } W / 2 \leq 100, \quad (1a)$$

$$\log(W / 2) = 4.14\log T - 3.61 \text{ для } W / 2 \geq 40. \quad (1б)$$

Здесь  $W$  – удвоенная кинетическая энергия метеороида в килотоннах,  $T$  – период инфразвуковой волны максимальной амплитуды для двух диапазонов энергии крупных взрывов в секундах.

В работе [Голицын и др., 1977] дается подробное решение задачи о пролете метеороида в земной атмосфере. Для описания атмосферных эффектов в низкочастотном диапазоне (период колебаний больше секунды) применяется следующая гидродинамическая модель. Считается, что раскаленный метеороид, летящий со скоростью  $V_0$ , практически мгновенно образует светящийся след длиной  $L$  и радиусом  $a$  и за время, равное  $t=L/V_0$ , выделившаяся энергия передается окружающей атмосфере. Этот след одновременно является источником массы, вбрасываемой в атмосферу, источником дополнительной энергии  $E_0$  и количества движения  $K=F_s(L/V_0)$ , где  $F_s$  – сила, с которой атмосфера действует на испаряемое метеоритное вещество. Пространственно-временные функции распределения этих величин имеют импульсный характер и аналитически задаются в виде дельта-функций. В этой работе считается, что метеорное вещество сгорает полностью, а главной излучающей средой является испаряемое в атмосферу вещество космического тела.

Эксперименты по наблюдению инфразвуковых волн активно проводятся как в России [Shumilov et al., 2003], так и за рубежом [Antier et al., 2007]. Так, в работе [Shumilov et al., 2003] описаны эффекты в инфразвуковом диапазоне частот, связанные с пролетом болида в атмосфере Восточной Сибири (Россия, Витимский болид, см. таблицу). Инфразвуковой сигнал амплитудой около 45 мкбар был зарегистрирован инфразвуковой станцией в Апатитах на расстоянии около 4000 км от места вхождения болида в атмосферу. Для оценки параметров болида используются выводы работы [Голицын и др., 1977]. Так, масса Витимского болида, по оценке авторов [Shumilov et al., 2003], составляет минимум 6 т. Эта оценка сделана без учета потерь сигнала при распространении.

В последние годы исследования инфразвуковых эффектов от пролета в атмосфере Земли и падения

метеороидов получили значительное развитие в связи с организацией Международной системы мониторинга несанкционированных ядерных испытаний (IMS). В настоящее время на земном шаре развернуто более шестидесяти инфразвуковых станций IMS, которые способны обеспечивать мониторинг падения метеороидов. Так, в работе [Antier et al., 2007] приводятся результаты наблюдений падения крупного метеороида Desaguedero на границе Боливии и Перу с использованием сейсмических и инфразвуковых средств IMS, расположенных в этом регионе. Столкновение метеороида с поверхностью Земли было зарегистрировано сетью боливийских сейсмических станций на расстоянии 115 км от места падения. Дополнительно было проведено моделирование акустических лучей от предполагаемого источника, движущегося со сверхзвуковой скоростью на некоторой высоте. В качестве источника рассматривалась ударная волна, генерированная почти цилиндрической поверхностью излучения. Анализ показал, что в процессе генерации звука, по-видимому, доминировала фрагментация метеороида при сверхзвуковом входе небесного тела в земную атмосферу, а не сверхзвуковой удар при его пролете в атмосфере. Разница между расчетным (модельным) и наблюдаемым временами прихода сейсмических и инфразвуковых волн указывает на то, что интенсивные инфразвуковые сигналы, вероятно, образовались от двух основных тепловых взрывов на высотах 25 и 35 км вдоль траектории с азимутальным углом 110° и углом места 50°. Азимуты источника и углы места двух когерентных волновых приходов обнаружены по регистрограммам боливийской инфразвуковой станции IO8VO. Кроме того, эти данные подтверждаются сообщениями очевидцев. Оценки энергии взрывов этих двух фрагментов составляют от 1 до 3.8 кт в тротиловом эквиваленте (ТНТ).

#### Аппаратура и методика регистрации Челябинского метеороида в ИСЗФ СО РАН

##### Параметры инфразвуковой станции «Торы»

Инфразвуковая станция Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН) находится в нескольких километрах от пос. Торы Тункинского района Бурятии на территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (приблизительно в 150 км от г. Иркутска). Местность, в которой расположена инфразвуковая станция, представляет собой ровную, с пониженным рельефом, долину реки Иркут, местами заболоченную. Ровный рельеф долины весьма благоприятен для приема инфразвуковых волн, так

как отсутствуют различного рода отраженные и интерференционные сигналы. С другой стороны, открытая, даже без мелкого кустарника, местность способствует развитию ветровой турбулентности, особенно заметной в летний период. Инфразвуковая аппаратура установлена в выносных павильонах и представлена блоком инфразвукового микробарографа, разработанного в ИСЗФ СО РАН [Ерущенко и др., 1974], устройством калибровки и системой шумоподавления в виде трубной линии длиной 60 м с двадцатью входными капиллярами. Сигнал на регистрацию передается посредством кабельной линии. Основные характеристики инфразвукового микробарографа с усилителем следующие: динамический диапазон – 80 дБ; полоса частот – 0.01–3 Гц; собственный шум – 0.01 мкбар; чувствительность – 0.05 В/мкбар.

#### Методика регистрации

Для регистрации инфразвукового сигнала (после усиления и фильтрации) используется плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ЛА-1.5 РС1.

Характеристики АЦП: разрядность – 12 бит, диапазон входных напряжений – 10; 5.0; 2.5; 1.0; 0.5; 0.2; 0.1 и 0.05 В. Для регистрации используется программное обеспечение компании «Руднев-Шилев» [Преобразователь измерительный..., 2002]: программный самописец низкочастотных процессов АЦП «Saver2», утилита для просмотра бинарных файлов «Viewer», преобразователь бинарных файлов в текстовые «Converter». Частота дискретизации сигнала по каждому каналу составляет 10 Гц. В процессе регистрации используется схема сбора инфразвуковой информации, описанная в работе [Сорокин, 2013]. Расположение микробарографов показано на рис. 1, откуда видно, что микробарографы располагаются в углах равнобедренного прямоугольного треугольника.

#### Полученные результаты

Атмосфера Земли является упругой средой, в которой легко возбуждаются и свободно распростра-

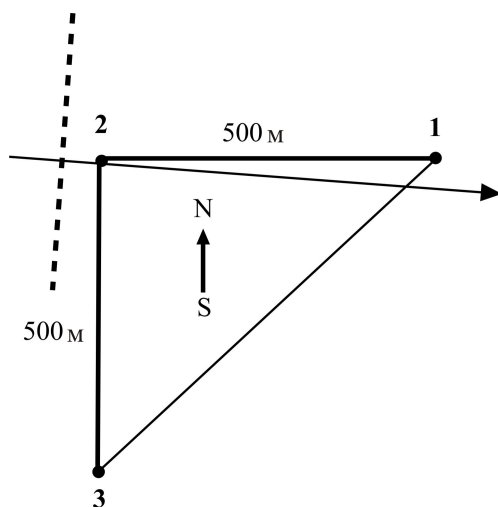


Рис. 1. Расположение микробарографов на ст. «Торы»: 1, 2, 3 – номера павильонов с микробарографами. Штриховой линией показан фронт инфразвуковой волны от взрыва Челябинского болида 15 февраля 2013 г., полученный по расчетам кросскорреляционных временных задержек инфразвукового сигнала.

няются акустические волны. Поэтому 15 февраля 2013 г., когда произошло вторжение крупного небесного тела в земную атмосферу в районе Челябинска, был отмечен ряд геофизических эффектов, в том числе мощное излучение в инфразвуковом диапазоне частот. Подобные события являются достаточно редкими, однако имеется значительное количество работ, посвященных их наблюдениям и интерпретации [Goerke, 1966; Shoemaker, Lowery, 1967; Woodward, Goerke, 1967; Shumilov et al., 2003; Revelle, 1976; Голицын и др., 1977]. Инфразвуковой сигнал от Челябинского метеороида наблюдался на инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН, расположенной в 150 км от Иркутска, в 05:51 UT. Волна давления, возникшая от взрыва метеороида, по сообщению в прессе, образовалась в 03:20 UT. При расстоянии от Челябинска до Иркутска 2780 км характерное время распространения инфразвукового сигнала составило 2 ч 31 мин. Это соответствует распространению наблюдаемого инфразвукового сигнала со звуковой скоростью (~307 м/с). Для уточнения происхождения инфразвукового сигнала использовались следующие характеристики:

- 1) амплитуда сигнала – более чем на порядок превышает уровень атмосферного фона;
- 2) скорость распространения сигнала – соответствует звуковой;
- 3) азимут источника сигнала, вычисленный с помощью кросскорреляционных расчетов, – соответствует местоположению Челябинского события 15 февраля 2013 г.

Как видно на рис. 2, инфразвуковой сигнал, зарегистрированный на станции ИСЗФ СО РАН 15 февраля 2013 г., имеет достаточно сложную структуру. Здесь явно выделяются три цуга колебаний, из которых наиболее продолжительным и мощным является первый продолжительностью около 650 с и амплитудой (пик-в-пик) 15 мкбар. Первый цуг инфразвуковых колебаний появился в 05:51 UT как сигнал с устойчивым выделенным азимутом. Последовательность цугов такова, что через 650–660 с от начала прихода сигнала следует второй и еще через 150–200 с – третий цуг колебаний. Второй и третий цуги имеют примерно в три раза меньшую продолжительность (около 200 с) и в два раза меньший размах колебаний (7 мкбар).

На основе полученных данных построен спектр мощности первого цуга и выделены доминирующие периоды колебаний (рис. 3). Спектр первого цуга колебаний содержит более низкие частоты, чем спектры двух следующих цугов. Это свидетельствует о значительной мощности первого этапа фрагментации метеороида. Интересно выяснить, как структура инфразвукового сигнала связана с процессом вхождения метеороида в атмосферу и особенно с процессом его фрагментации.

Как показывает пример Челябинского метеороида, еще только приближающийся к поверхности Земли космический объект уже может представлять большую опасность. Имеющее огромную скорость космическое тело в атмосфере Земли возбуждает сильную ударную волну, которая за фронтом впереди тела вызывает нагрев до нескольких тысяч градусов и создает давление в несколько тысяч атмосфер, способствующие испарению и разрушению метеороида. Фрагментация может происходить по-разному,

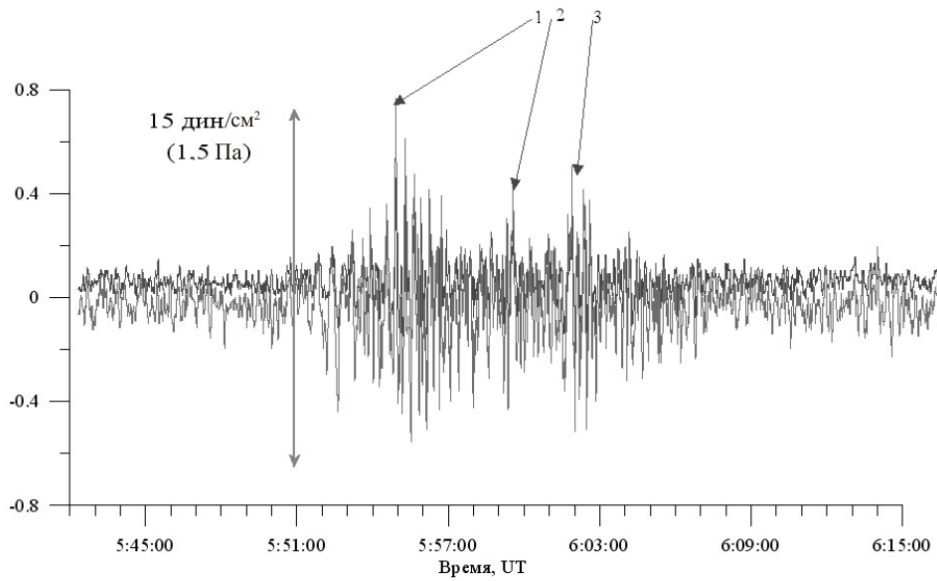


Рис. 2. Инфразвуковой сигнал от Челябинского метеороида 15.02 2013 г., зарегистрированный на инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН. Стрелками показаны последовательно пришедшие цуги инфразвукового сигнала.

в значительной степени это зависит от конфигурации лобовой части метеороида, наличия трещин, неоднородностей. В процессе фрагментации резко увеличивается эффективная площадь взаимодействия с атмосферой и возрастает темп превращения кинетической энергии в тепло, что может приводить к серии взрывов. Как следует из сообщений прессы, в Челябинске было слышно три взрыва от метеороида: первый – как следствие разрушения основного тела метеороида на два фрагмента на высоте 30–25 км, а второй и третий – как следствие разрушения этих фрагментов. Это подтверждается раздвоением дымового шлейфа, наблюдавшимся после мощного первого взрыва (рис. 4, а) [Горькавый и др., 2013]. Таким образом, структуру инфразвукового сигнала можно было бы объяснить особенностями теплового разрушения метеороида. На рис. 4, б приведена возможная схема образования фрагментов метеороида и появления последовательности двух тепловых взрывов. С другой стороны, как показывает регистраграмма, амплитудные цуги инфразвукового сигнала (рис. 2), записанного на расстоянии почти 3000 км, имеют ту же временную последовательность, что и взрывы, но гораздо большую продолжительность. Действительно, два последующих сигнальных цуга появились примерно через 650 с после появления первого сигнального цуга. Длительности второго и третьего сигнальных цугов составили около 200 с, в то время как финальный этап пролета и разрушения метеороида в Челябинске занимал менее 60 с. Понятно, что разрушение метеороида, его торможение и изменение направления дальнейшего движения к Земле, а также последующие взрывы фрагментов происходили в структурно-неоднородной атмосфере. В таких условиях вполне возможно возбуждение инфразвукового сигнала многолучевой структуры, который распространяется в атмосферном акустическом канале и в пункте приема регистрируется в виде волновых цугов увеличенной продолжительности.

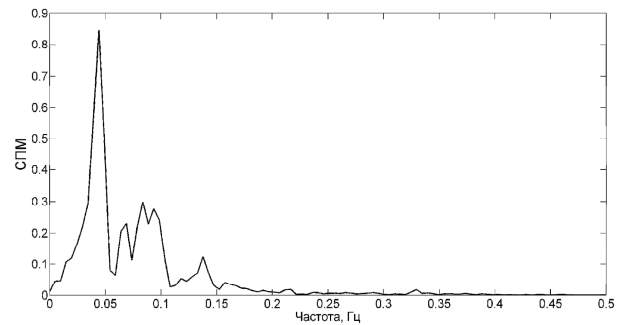


Рис. 3. Спектр мощности первого цуга инфразвукового сигнала от взрыва Челябинского метеороида 15.02.2013 г.

Для выяснения связи характера фрагментации метеороида с реальной структурой инфразвукового сигнала необходимы дополнительные данные и расчеты.

Оценки энергии взрыва метеороида для разных мест наблюдений весьма различаются. Это может быть обусловлено как локальными условиями, так и характером трассы распространения. Поэтому логично использовать среднюю оценку энергии. В работе [Le Pichon et al., 2013] средняя мощность взрыва оценивалась по данным двенадцати станций наблюдений IMS и составила 460 кт. Для оценки энергии взрыва в этой работе было использовано эмпирическое регрессионное соотношение (16) [Revelle, 1997]. Таким же образом можно получить локальную оценку энергии взрыва метеороида на основе данных инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН. Так, для периодов  $T$  от 16 до 20 с, соответствующих максимальной амплитуде инфразвукового сигнала (см. рис. 5), энергия взрыва  $W$  составила от 55 до 120 кт. Если же принять во внимание период низкочастотных колебаний  $T \sim 32$  с, то энергия взрыва метеороида составляет  $\sim 436$  кт.

В заключение сделаем несколько замечаний о форме инфразвукового сигнала, приведенного на регистро-

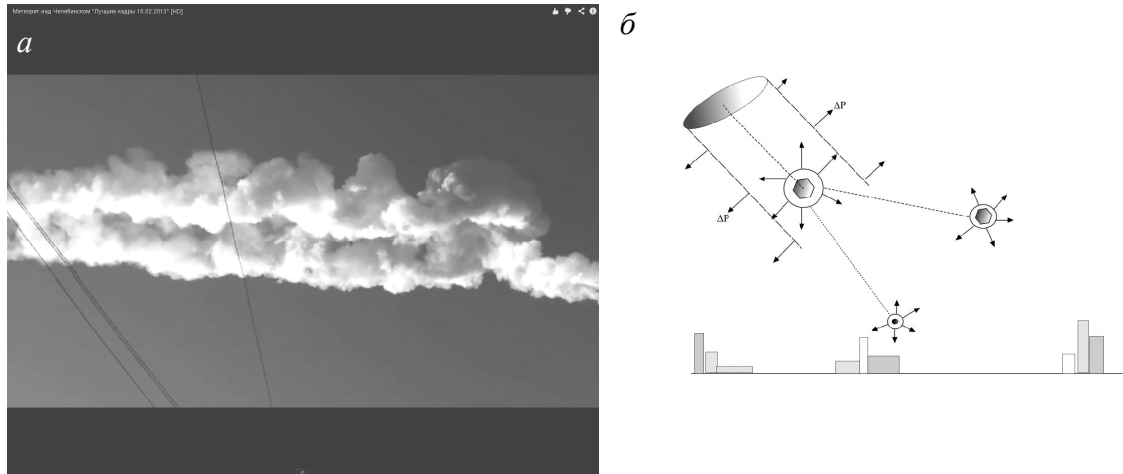


Рис. 4. Образование трехцуговой структуры инфразвукового сигнала: *a* – фото [Горькавый и др., 2013] метеороида на стадии разрушения, *б* – схема образования двух фрагментов и их взрывов.

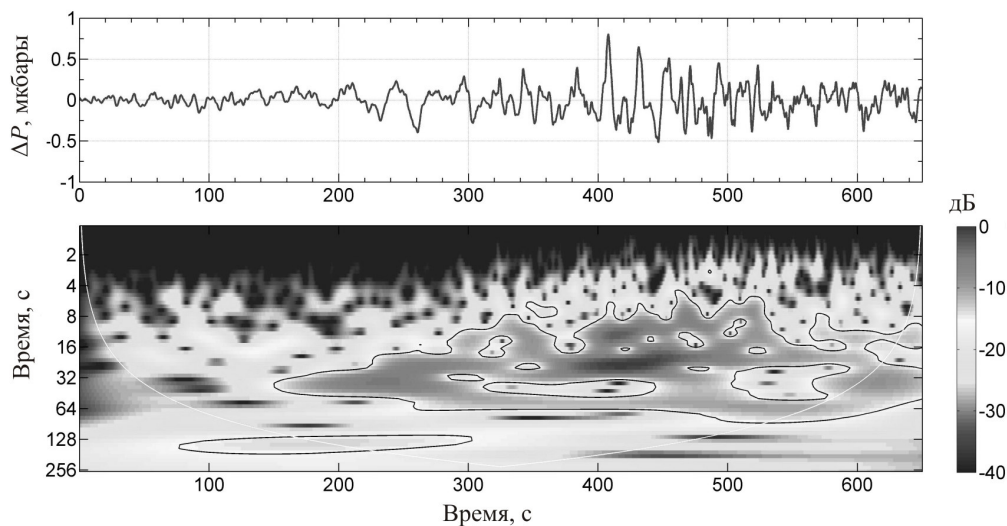


Рис. 5. Исходный сигнал длительностью 650 с (вверху), вид которого характерен для высотной нагретой пульсирующей структуры (для высотного взрыва, как у Тунгусского метеорита [Золотов, 1969]). Вейвлет-преобразование первого цуга инфразвукового сигнала метеороида (внизу). В расчетах использована база вейвлет-преобразования Морле.

грамме (рис. 2), и первого цуга сигнала, показанного на верхней панели рис. 5. На рис. 5 видно, что первый цуг сигнала состоит из двух частей: вначале присутствует короткое низкочастотное вступление, а далее основное тело сигнала заполняют более высокочастотные колебания. Начало сигнала характеризуется низкочастотными колебаниями в течение трех-четырех периодов с периодом около 32 с.

Попытаемся объяснить структуру данного инфразвукового сигнала. Оказывается, все взрывы, в том числе и высотные атмосферные взрывы, можно разделить на два типа по концентрации энергии на единицу массы взрывчатого вещества (ВВ). Эти два типа взрывов резко, на несколько порядков, различаются между собой, например, как обычный химический и ядерный взрывы. Концентрация энергии в первом случае достигает  $4 \cdot 10^{10}$  эрг/г, а во втором –  $8.4 \cdot 10^{17}$  эрг/г. При взрыве ВВ с малой концентрацией энергии образуется относительно большое количество горячих газообразных продуктов взрыва.

Поэтому можно считать, что в переходе в равновесное состояние участвует не атмосферный воздух, а только газообразные продукты взрыва. Процесс установления равновесия при наличии противодействия со стороны атмосферы обычно происходит за несколько циклов сжатия и разрежения. Размер образовавшегося при взрыве газового шара определяет период его собственных колебаний. В таком случае отношение амплитуд двух последовательных этапов колебаний характеризует затухание процесса и энергию первичных и вторичных колебаний – соответственно 75 и 25 % [Баум и др., 1959].

Во взрыве с большой концентрацией энергии в малом объеме ( $Q \approx 10^{18}$  эрг/г) участвует относительно малое количество вещества, поэтому в результате образуется малое количество продуктов взрыва, которым можно пренебречь при анализе последующего процесса установления состояния равновесия атмосферы. Взрыв с высокой концентрацией энергии в малом объеме, например ядерный, можно рассматривать

как точечный. В этом случае атмосфера, выведенная из равновесия мощным импульсом взрыва, возвращается к первоначальному состоянию аperiодически, без вторичных колебаний [Баум и др., 1959]. Поэтому следствиями взрыва с большой концентрацией энергии являются относительно короткий импульс давления и широкий спектр инфразвуковых частот. Хорошо известно, что распространение взрывных волн в атмосфере характеризуют две особенности:

1. Поглощение в атмосфере высокочастотных звуковых волн происходит быстрее, чем низкочастотных. Для звуковых волн атмосфера является фильтром нижних частот, поэтому на расстояния в несколько тысяч километров распространяются (и, как следствие, регистрируются на микробарографах) только низкочастотные инфразвуковые волны с периодом колебаний от 8–12 до 300 с.

2. Инфразвуковые волны распространяются в атмосфере с различной скоростью. Нижние слои атмосферы представляют собой волновод, при распространении в котором инфразвуковые волны испытывают дисперсию. Наибольшей дисперсии подвержены волны с периодом колебаний от 8–12 до 100 с [Золотов, 1966]. При этом волны с периодом до 30 с имеют нормальную дисперсию, т. е. при увеличении периода колебаний в этом интервале скорость волны уменьшается с 305 до 295 м/с, а волны с периодом от 30 до 100 с и более имеют прямую дисперсию, т. е. при увеличении периода от 30 с и выше скорость волн увеличивается с 295 до 330 м/с [Пасечник, 1962]. Поэтому структура инфразвукового сигнала от взрыва с высокой концентрацией энергии, регистрируемого на расстоянии в несколько тысяч километров, такова, что впереди присутствует более быстрый низкочастотный сигнал, связанный с первым коротким ударным импульсом. Затем развивается высокочастотный пульсирующий инфразвуковой «хвост», связанный с тепловой осцилляцией газового шара, стремящегося к равновесию.

### Заключение

В работе проанализирована методика выделения инфразвуковых сигналов от крупных космических тел. Получена регистрируемая инфразвуковая сигнала и подробно описан эффект от вторжения в атмосферу Челябинского метеороида. В работе показано, что по форме инфразвукового сигнала взрыв Челябинского метеороида относится к категории взрывов с высокой концентрацией энергии и подобен Тунгусскому событию 1908 г. На основе эмпирических соотношений для крупных взрывов сделана оценка энергии, выделившейся при взрыве метеороида.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: Физматгиз, 1959. 801 с.  
 Голицын Г.С., Григорьев Г.И., Докучаев В.П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, № 9. С. 926–935.

Горькавый Н.Н., Тайдакова Т.А., Проворникова Е.А. и др. Аэрозольный шлейф Челябинского болида // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47, № 4. С. 299–303. doi:10.7868/S0320930X13040166.  
 Ерущенко А.И., Пономарев Е.А., Турчанинов И.П. Прибор для регистрации инфраакустических и гравитационных атмосферных волн // *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. Иркутск, 1974. Вып. 34. С. 50–57.  
 Золотов А.В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 года. Минск: Наука и техника, 1969. 202 с.  
 Кринов Е.Л. Тунгусский метеорит. М.: Изд-во АН СССР, 1949. 191 с.  
 Мезенин Н.А. Занимательно о железе. М.: Металлургия, 1972. 200 с.  
 Пасечник И.П. Наука доказала: ядерные взрывы можно обнаружить, где бы они ни производились // *Природа*. 1962. № 7.  
 Преобразователь измерительный аналого-цифровой ЛА-1.5 PCI // *Руководство по эксплуатации*. ВКФУ.411619.060-01РЭ / ЗАО «Руднев-Шиляев». М., 2002. 130 с.  
 Сорокин А.Г. Предварительные результаты, полученные на инфразвуковой станции «Торы» // *Солнечно-земная физика*. 2013. Вып. 22. С. 77–80.  
 Antier K., Le Pichon A., Cansi Y., et al. Atmospheric entry and impact of the September 15, 2007 Desaguedero Meteoroid // *Inframatics*. 2008. N 21. P. 2–12.  
 Brown P., Spalding R.E., Revelle D.O., et al. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // *Nature*. 2002. V. 420. P. 294–296.  
 Edwards W.N., Brown P.G., Revelle D.O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 1136–1160.  
 Ens T.A., Brown P.G., Edwards W.N., Silber E.A. Infrasound production by bolides: A global statistical study // *Ibid*. 2012. V. 80. P. 208–229.  
 Goerke V.H. Infrasonic observations of fireball // *Sky Telesc.* 1966. V. 32. P. 313.  
 Le Pichon A., Geranna L., Pilger C., et al. The 2013 Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, iss. 14. P. 3732–3737. doi:10.1002/grl.50619.  
 Revelle D.O. On meteor-generated infrasound // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81, N 7. P. 1217–1230.  
 Revelle D.O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1997. V. 822. P. 284–302. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-6632-1997.tb48347.x>.  
 Shoemaker E.M., Lowery C.J. Airwaves associated with large fireballs and frequency distribution of energy of large meteoroids (abstract) // *Meteoritics*. 1967. V. 3. P. 123–124.  
 Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Tereshchenko E.D., et al. Detection of infrasound from the Vitim Bolide on September 24, 2002 // *JETP Letters*. 2003. V. 77, N 2. P. 115–117.  
 Woodward M.W., Goerke V.H. Infrasound from the September 18, 1966 meteorite (abstract) // *EOS Trans. AGU*. 1967. V. 48. P. 81–82.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*