

УДК 551.558, 551.596, 534.221

Л. Ф. Черногор¹, А. И. Лящук²

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы 4, Харьков, 61022, Украина
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

²Главный центр специального контроля
Государственного космического агентства Украины
пгт. Городок, Украина

Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г.

По данным инфразвуковых станций определены основные параметры инфразвуковых волн, сгенерированных в процессе полета и взрыва Челябинского космического тела: время запаздывания, длительность, спектральный состав, дисперсионная зависимость и скорость прихода. Проведено моделирование параметров инфразвуковых волн. Сравнение результатов моделирования и наблюдения показало их хорошее соответствие.

ПАРАМЕТРИ ІНФРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ, ЗГЕНЕРОВАНИХ ЧЕЛЯБІНСЬКИМ МЕТЕОРОЇДОМ 15 ЛЮТОГО 2013 р., Черногор Л. Ф., Лящук О. І. — За даними інфразвукових станцій визначено основні параметри інфразвукових хвиль, згенерованих у процесі польоту та вибуху Челябинського космічного тіла: час запізнення, тривалість, спектральний склад, дисперсійна залежність та швидкість приходу. Проведено моделювання параметрів інфразвукових хвиль. Порівняння результатів моделювання та спостереження показало їхню добру відповідність.

THE PARAMETERS OF INFRASONIC WAVES GENERATED BY CHELYABINSK METEOROID 15 FEBRUARY 2013, by Chernogor L. F., Liashchuk O. I. — According to infrasound stations observations the basic parameters of infrasonic waves generated during the flight and explosion of the Chelyabinsk space body were found: delay time, duration, spectral structure and dispersional dependence and the celerity. The infrasonic waves parameters were simulated. Comparing of the simulation and observations results has shown their good match.

ВВЕДЕНИЕ

15 февраля 2013 г. в 03:20:22 UT (в 09:20:22 по местному времени) произошло редкое, но впервые в истории наблюдений хорошо задокументированное событие — падение и взрыв в районе г. Челябинск (Россия) метеороида. Пролет Челябинского метеороида сопровождался целым комплексом физических процессов в атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле. Их описанию посвящен ряд работ [1—3, 5, 6, 9, 11, 17—19, 22—28, 32, 34, 35].

Одним из важных физических эффектов, сопутствовавших полету и взрыву метеороида, был эффект генерации акустико-гравитационных волн (АГВ), представляющих собой сочетание внутренних гравитационных волн (ВГВ) и акустических волн (инфразвука). Исследованы проявления ВГВ на ионосферных высотах [5, 19, 22, 23, 25—27]. Результаты наблюдения инфразвукового излучения представлены в работах [1, 12, 13], а результаты теоретических оценок и моделирования — в работах [17, 18, 20, 21, 24, 28].

По данным видеорегистраторов определены направление полета, угол наклона траектории к горизонту (около 18°) и начальная скорость космического тела (18.5 ± 0.8 км/с). По энергиям вспышки, ударной волны, акустических и сейсмических колебаний была оценена энергия взрыва (около 90 кт ТНТ) и начальная кинетическая энергия E_{k0} (около 440 кт ТНТ) [1—3, 6, 9, 11, 17, 18, 28, 34, 35].

Инфразвуковой эффект метеороидов изучается уже несколько десятков лет [15, 16, 29—31, 33, 34, 37—39]. Установлены основные закономерности инфразвуковых эффектов при вторжении в атмосферу относительно мелких космических тел.

Для физики небесных тел и физики атмосферы представляет интерес более детальный анализ акустических эффектов, сопровождавших падение и взрыв Челябинского метеороида, диаметр которого был около 18 м.

Целью настоящей работы является оценка параметров инфразвукового сигнала (времени запаздывания, длительности, спектрального состава, скорости прихода) при его распространении в атмосфере, сравнение результатов наблюдений и моделирования параметров сигнала.

Как известно, АГВ начинают генерироваться на высотах, где баллистическая ударная волна становится достаточно сильной. Для Челябинского метеороида эта высота близка к высоте начала свечения следа метеороида ($z = 50...55$ км). Интенсивность АГВ значительно увеличилась после основного энерговыделения (взрыва метеороида) на высоте около 23 км.

Инфразвуковые волны, возникшие после пролета и взрыва Челябинского тела, зарегистрированы инфразвуковыми станциями международной системы мониторинга (МСМ) ядерных испытаний с энерговыделением не менее 1 кт, а также станциями, расположенными в ряде

геофизических обсерваторий. Ближайшая от места взрыва метеороида станция дислоцирована в г. Актюбинск, Республика Казахстан (расстояние от источника инфразвука $R = 540$ км), наиболее удаленная станция — в Антарктиде ($R = 15500$ км по короткой трассе и $R = 25000$ км по длинной трассе).

Порожденные Челябинским метеороидом инфразвуковые волны, испытав многократные отражения, преломление и рассеяние в атмосфере и преодолев расстояние в сотни, тысячи и десятки тысячи километров были зарегистрированы чувствительными микробарографами. Амплитуда и спектр инфразвука несут в себе информацию об источнике волн и параметрах атмосферы [15, 16, 29—31, 33, 34, 37—39].

Исследования показали, что амплитуда инфразвука сильно зависит от скорости и направления ветра на тропосферных и стратосферных высотах, направления на станцию и метеоусловий на трассе распространения. Оказалось, что амплитуда сигнала может изменяться на порядок и более при одной и той же мощности источника (см. [6]). По этой причине измерения амплитуды инфразвука не всегда могут быть положены в основу метода определения энергии взрывного источника. Для оценки кинетической энергии тела предпочтительны измерения периода основного колебания инфразвука.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Средства наблюдения. Известно, что качество регистрации инфразвуковых сигналов существенно зависит от целого ряда факторов, таких как географические условия, расстояния до пунктов регистрации, состояния атмосферы и метеорологических условий на трассе и в пункте приема.

Регистрация инфразвуковых сигналов на пункте наблюдения «Каменец-Подольский» (Украина), ведется с помощью акустических станций К-304А, которые имеют в своем составе микробарографы с частотной полосой 0.003...12 Гц [8]. Есть три режима чувствительности станции: 1, 10, 100 Па. Измеряемая информация в цифровом виде регистрируется на персональном компьютере, затем она подвергается дальнейшей обработке.

Для проведения пространственной селекции обнаруженных сигналов и обеспечения достаточного отношения сигнал/шум в пункте наблюдения используется группа станций. Группа состоит из четырех элементов, которые для получения оптимальной диаграммы направленности размещены на вершинах равностороннего треугольника, четвертый элемент расположен в центре треугольника. Расстояние между станциями составляет в среднем 150 м.

Ко входам каждого микробарографа подключено помехозащитное устройство. Оно играет основную роль в процессе снижения уровня помех от приземного ветра и турбулентности в атмосфере. С выходов микробарографов электрические сигналы кабелями передаются к

аналого-цифровому преобразователю и далее к рабочей станции, где осуществляется накопление информации в определенном формате, ее первичная обработка, синхронизация времени по GPS и передача данных в центр данных. В центре данных проводится полная обработка информации, включая оценки временных, частотных и пространственных характеристик сигналов.

На российской станции IS46 (Залесово) схема построения элементов такая же, как и на украинской станции, за исключением увеличенной апертуры*.

Конфигурация казахстанской станции IS31 несколько сложнее**. Геометрически группа состоит из трех элементов в форме равнобедренного треугольника и центрального элемента, который в свою очередь образует малую группу из четырех элементов в форме квадрата. Сторона треугольника равна 2 км, а сторона квадрата — 300 м.

На станции IS27*** (Антарктида) в качестве акустических систем используются инфразвуковые станции MB2000 с частотной полосой 0.001...20 Гц, чувствительностью датчика 20 мВ/Па и диапазоном давлений ± 500 Па. Динамический диапазон составляет 108 дБ. Для оптимального обнаружения инфразвуковых сигналов измерительные элементы геометрически расположены в девяти точках вдоль спирали с равномерно увеличивающимся радиусом. Расстояние от центрального до крайнего элемента по прямой составляет около 1.3 км.

Методика выделения инфразвуковых сигналов на фоне шумов базируется на следующем принципе. Смесь сигнала и шума записывается определенной последовательностью дискретных отсчетов на каждом из элементов группы. Считается, что полезный сигнал является когерентным, в то время как шум является случайным и некогерентным для каждого элемента группы. Отдельные микробарографы регистрируют сигнал в разные моменты времени по мере распространения через группу. По кросскорреляциям между парами датчиков определяются временные задержки между отдельными датчиками, которые в свою очередь зависят от геометрии группы и характеристик фронта волны. Азимут и скорость сигнала получают из анализа временных задержек.

Данные наблюдений на станциях МСМ (IS27, IS37, IS46) предоставлены Международным центром данных Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

Методы анализа. Временные зависимости флуктуаций давления воздуха подвергались системному спектральному анализу, который использует взаимодополняющие оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. В последнем случае в качестве базисной функции применялся вейвлет

* <http://www.ctbto.org/verification-regime/station-profiles/>

** <http://www.kndc.kz/index.php/ru/observation-network-menu-ru/infrasound-stations-menu-ru/aktyubinsk-is31kz-menu-ru>

*** http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Seismologie/Kernwaffenteststopp_en/%C3%9Cberwachungsnetz_en/Deutsche-IMS-Stationen/deutsche-ims-stationen_inhalt.html

Морле [7, 14]. Такой вид вейвлета целесообразно использовать для анализа цугов колебаний. Именно таким был акустический сигнал, порожденный полетом и взрывом Челябинского космического тела.

Добавим, что при применении адаптивного преобразования Фурье адаптация производится к периодам искомым спектральных составляющих, поэтому оно имеет лучшее, чем оконное преобразование Фурье разрешение по частоте (периоду) колебаний. Оконное преобразование Фурье имеет лучшее, чем адаптивное преобразование Фурье разрешение по времени. Основным преимуществом вейвлет-преобразования является его способность «уравнивать шансы» спектральных составляющих с сильно различающимися частотами (периодами).

РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для анализа использовались данные ряда инфразвуковых станций (табл. 1). Одна из них (IS46) находилась восточнее, другая (К-304А) — западнее от места взрыва метеороида. Две другие дислоцированы южнее места события, причем длина трасс сильно различалась: 540 и 15500 км. Для станции в Антарктиде анализировался сигнал, распространявшийся как по короткой (расстояние $R = 15500$ км), так и по длинной ($R = 25000$ км) трассах.

Временная зависимость флуктуаций давления воздуха $p(t)$ для станции IS31 (г. Актюбинск) и результаты системного спектрального анализа приведены на рис. 1, а. Видно, что значительное (до 5 Па) увеличение амплитуды флуктуаций имело место в интервале времени 03:52...03:59. Если это увеличение вызвано полетом и взрывом Челябинского метеороида, то время запаздывания инфразвукового сигнала $t = 32$ мин, а его длительность $T = 7$ мин. В спектре сигнала наблюдались гармоники с периодами $T = 20...90$ с. Максимальная энергия была сосредоточена в диапазоне периодов $T = 40...50$ с. С уменьшением T время запаздывания составляющих сигнала увеличивалось.

Временные вариации $p(t)$ на российской инфразвуковой станции, а также результаты системного спектрального анализа показаны

Таблица 1. Параметры инфразвуковых станций и акустических сигналов

| Название станции, принадлежность | Координаты станции | R , км | t , мин | v , м/с | v , м/с | T , мин |
|---------------------------------------|-----------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| IS31, Актюбинск, Республика Казахстан | 50.4° с. ш., 58.0° в. д. | 540 | 32 | 281 | 304 | 7 |
| IS46, Залесово, Российская федерация | 53.9° с. ш., 84.8° в. д. | 1520 | 83 | 310 | 279 | 10 |
| ММАГ2, Каменец-Подольский, Украина | 47.8° с. ш., 27.1° в. д. | 2500 | 172 | 239 | 269 | 15 |
| IS27, Ноймайер, Антарктида | короткая трасса | 15500 | 861 | 290 | 292 | 25 |
| | длинная трасса | 25000 | 1417 | 294 | 292 | 40 |

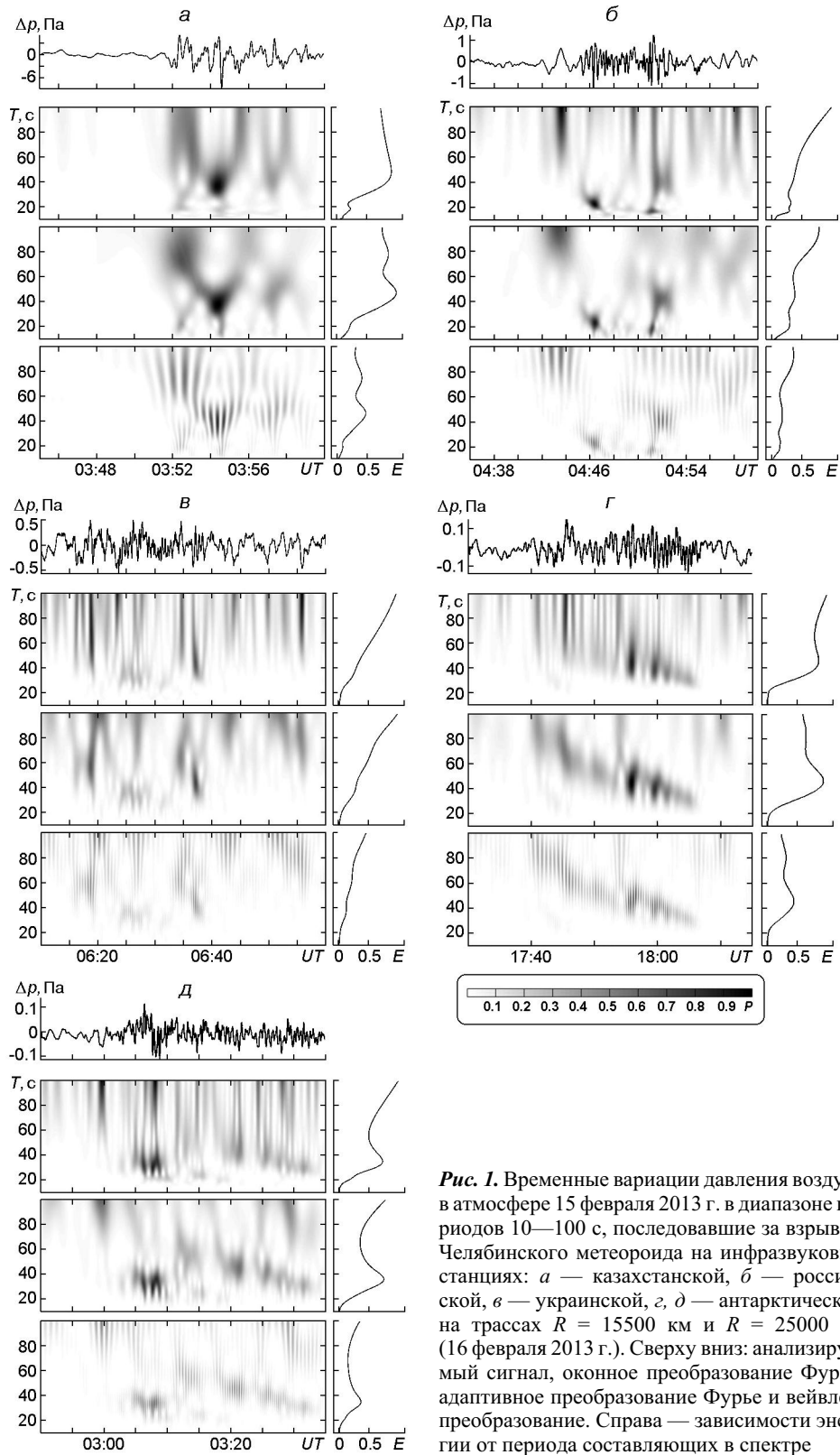


Рис. 1. Временные вариации давления воздуха в атмосфере 15 февраля 2013 г. в диапазоне периодов 10—100 с, последовавшие за взрывом Челябинского метеороида на инфразвуковых станциях: *a* — казахстанской, *б* — российской, *в* — украинской, *г, д* — антарктической на трассах $R = 15500$ км и $R = 25000$ км (16 февраля 2013 г.). Сверху вниз: анализируемый сигнал, оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Справа — зависимости энергии от периода составляющих в спектре

на рис. 1, б, из которого видно, что существенное (в 5...10 раз) увеличение амплитуды сигнала наблюдалось с 04:43 по 04:53. При этом t — 83 мин, а T — 10 мин. В спектре инфразвукового сигнала наблюдались гармоники с T — 20...100 с. При уменьшении периода время запаздывания составляющих инфразвукового сигнала увеличивалось.

Временная зависимость $p(t)$ и результаты системного спектрального анализа для украинской инфразвуковой станции приведены на рис. 1, в. Видно, что характер временных вариаций заметно изменялся в интервале времени 06:12...06:27. Если эти вариации вызваны воздействием Челябинского метеороида, то время запаздывания реакции t — 172 мин, а ее продолжительность T — 15 мин. Зависимость время — период является спадающей. В спектре выделялись гармоники с периодами 20...40 и 45...60 с.

Результаты наблюдений и системного спектрального анализа зависимости $p(t)$ для антарктической станции представлены на рис. 1, з (R — 15500 км) и рис. 1, д (R — 25000 км). Из рис. 1, з видно, что характер флуктуаций давления заметно изменился (их амплитуда увеличилась в 3...5 раз) в интервале времени 17:41...18:06. Если это увеличение связано с падением Челябинского космического тела, то время запаздывания инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом, составляет 861 мин, а его длительность — 25 мин. При уменьшении T от 90 до 30 с время запаздывания составляющих сигнала увеличивалось от 861 до 886 мин.

Наибольшую энергию имели составляющие с T — 40...50 с.

Как видно из рис. 1, д, существенное (в 3...5 раз) увеличение уровня флуктуаций наблюдалось 16 февраля 2013 г. с 02:57 по 03:37. Если это увеличение обусловлено полетом и взрывом Челябинского метеороида, то время запаздывания реакции на это событие составляло 1417 мин, а длительность реакции составляла T — 40 мин. Как и в предыдущих четырех случаях, зависимость «время — период» была спадающей.

Данные о R , t и T для всех пяти регистраций $p(t)$ сведены в табл. 1. Видно, что увеличение R сопровождалось увеличением t и T практически по линейному закону.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Время запаздывания. Оно складывается из двух частей: времени t_1 распространения акустического сигнала от высоты взрыва z_e до поверхности Земли и времени t_2 его распространения от эпицентра взрыва до инфразвуковой станции. При $z_e = 23$ км [1, 2, 9, 11, 34, 35] и средней скорости звука в приземной атмосфере $v_s = 300$ м/с имеем $t_1 = 1.3$ мин. Значение $t_2 = R/v$, где v — средняя вдоль траектории скорость прихода инфразвукового сигнала. Ее можно вычислить из наблюдательных данных:

$$v = \frac{R}{t - t_1}.$$

Рассчитанные значения скорости v приведены в табл. 1.

Скорость прихода акустического сигнала. Рассчитанная из данных наблюдений скорость v состоит из двух составляющих:

$$v = v_0 + w \cos \alpha,$$

где v_0 — истинная скорость прихода инфразвукового сигнала, w — скорость ветра, α — угол между вектором скорости ветра и направлением от эпицентра взрыва до инфразвуковой станции. Как показали метеонаблюдения, в день взрыва метеороида в северном полушарии преобладал западный ветер. Его скорость можно оценить, зная скорость v для восточной (310 м/с) и западной (244 м/с) станций, для которых $\cos \alpha = 1$ и $\cos \alpha = -0.96$ соответственно. Тогда $w = 31$ м/с. Измерения скорости ветра на разных высотах дали близкий результат [12]. Скорректированное значение скорости прихода инфразвука v также приведено в табл. 1. Для антарктической станции значения v для обеих трасс близки (отличаются на 1.3 %). Среднее значение v составило 292 м/с.

Средняя скорость прихода инфразвука для всех трасс $v = 287$ м/с.

Длительность акустического сигнала. Она состоит из двух составляющих: продолжительности T_1 акустического излучения и удлинения T_2 сигнала из-за его дисперсионного расплывания, вызванного различными скоростями прихода спектральных компонентов сигнала. Первая вычисляется из выражения

$$T_1 = \frac{L}{\bar{v}_s} = 4 \text{ мин},$$

при значении эффективной длины излучающего следа метеороида $L = 75$ км [18, 20, 21] и средней скорости звука в диапазоне высот 50... 23 км $\bar{v}_s = 310$ м/с. Значение T_2 можно получить из выражения

$$T_2 = \frac{R}{v_2} - \frac{R}{v_1} = \frac{vR}{v(v - v_1)} - t_2 - t_1. \quad (1)$$

Здесь $v_1 = v$ и $v_2 = v - v$ — скорости прихода переднего и заднего фронтов инфразвукового сигнала, T_1 и T_2 — их времена запаздывания. Обычно $v \ll v_1$, тогда

$$T_2 = \frac{vR}{v - v_1} - \frac{v}{v_1} t_1,$$

где t_1 — время запаздывания переднего фронта сигнала. По известным значениям T_1 , T_2 и t_1 можно вычислить v/v_1 для каждой трассы (табл. 2). Видно, что с увеличением расстояния величина v/v_1 имеет тенденцию к уменьшению. Это связано с сужением спектра инфразвукового сигнала при его распространении в приземном волноводе.

Таблица 2. Параметры инфразвукового сигнала

| R , км | v , м/с | T_2 , мин | t_2 , мин | v/v_0 | v , м/с | p_a , Па | E_a , 10^{10} Дж |
|----------|-----------|-------------|-------------|---------|-----------|------------|----------------------|
| 540 | 304 | 3 | 30.7 | 0.098 | 29.8 | 3.16 | 2000 |
| 1520 | 279 | 6 | 81.7 | 0.073 | 20.4 | 0.55 | 5.8 |
| 2500 | 269 | 11 | 170.7 | 0.064 | 17.2 | 0.35 | 5.8 |
| 15500 | 292 | 21 | 859.7 | 0.025 | 7.3 | 0.11 | 5.9 |
| 25000 | 292 | 36 | 1415.7 | 0.025 | 7.3 | 0.07 | 6.2 |

Дисперсионная зависимость. Результаты системного спектрального анализа позволяют данному значению периода в спектре инфразвукового сигнала сопоставить значение времени запаздывания (скорости прихода). Зависимость скорости прихода компонентов инфразвукового сигнала, вычисленная по $t_2(R)$, от его периода приведена на рис. 2. Видно, что для всех регистраций функция $v(T)$ является возрастающей. Как и следовало ожидать, скорость прихода существенно зависит от трассы, метеоусловий на трассе, и в первую очередь от направления и скорости ветра в атмосфере. Примерно такая же тенденция поведения $v(T)$ описана в работе [10].

Энергетические оценки. Амплитуда инфразвукового сигнала несет информацию об энергии источника. К сожалению, ее величина существенно может искажаться при распространении сигнала. Чем длиннее трасса, тем сильнее могут быть искажения уровня инфразвукового сигнала. Для достаточно коротких трасс (в сотни километров), находящихся в зоне прямой видимости (точнее «слышимости») источник инфразвука — станция наблюдения, энергия акустического источника [16]

$$E_a = \frac{2 R^2 (p_a)^2 T}{\rho_0 v}, \quad (2)$$

где p_a — амплитуда акустического сигнала, $\rho_0 = 1.3 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха на поверхности Земли, v и T — скорость и длительность инфразвукового сигнала. Радиус зоны прямой видимости $R_0 = 570$ км.

Для ближайшей к эпицентру взрыва станции $R = 540$ км, $p_a^2 = 10 \text{ Па}^2$, $T = 7$ мин, $v = 304$ м/с. Тогда $E_a = 2 \cdot 10^{13}$ Дж. При

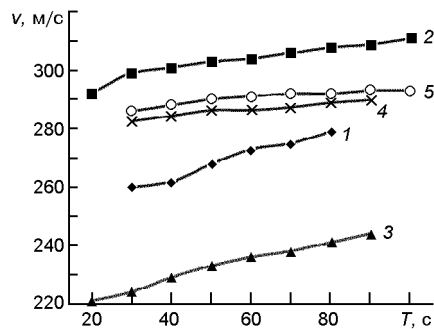


Рис. 2. Зависимость скорости прихода спектральных составляющих инфразвукового сигнала от их периода: 1 — казахстанская станция; 2 — российская станция; 3 — украинская станция; 4 — антарктическая станция ($R = 15500$ км); 5 — антарктическая станция ($R = 25000$ км)

начальной кинетической энергии метеороида $E = 1.9 \cdot 10^{15}$ Дж [18, 20, 21] имеем

$$\alpha = \frac{E_a}{E} = 1 \%$$

Такая доля энергии E преобразовалась в энергию инфразвука. При энергии взрыва $E_e = 3.8 \cdot 10^{14}$ Дж получим, что $\alpha_e = E_a / E_e = 5.3 \%$. Оценка α по порядку величины согласуется с результатами теоретических расчетов [4].

Для станций, удаленных на расстояние $R = R_0$, формула (2) несправедлива. Дело в том, что инфразвуковая волна захватывается в волновод, образованный поверхностью Земли и стратосферой, и распространяется далее в волноводе. При плотности энергии инфразвука

$$\frac{P_a^2}{2 \rho_0 (v)^2}$$

и объеме волновода

$$V = 2 R v T H,$$

где H — высота волновода,

$$E_a = \frac{R T H P_a^2}{\rho_0 v}.$$

Для украинской, российской и антарктической станций при $H = 25$ км $E_a = 5.9 \cdot 10^{10}$ Дж (см. табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ временных зависимостей флуктуаций давления в атмосфере, вызванных инфразвуковой волной, показал, что время запаздывания, скорость прихода и длительность цуга колебаний существенно зависели от ориентации и протяженности трассы, а также от метеоусловий на трассе. Наиболее качественными регистрациями временной зависимости уровня флуктуаций давления оказались регистрации на антарктической станции, что обусловлено, с одной стороны, более совершенной конфигурацией датчиков, а с другой — более низким уровнем помех. На других регистрациях проявлялись импульсные помехи, заметно искажающие спектры инфразвукового сигнала.

Выявлена и интерпретирована практически линейная зависимость времени запаздывания инфразвукового сигнала от длины трассы. Отклонение от строго линейного закона объясняется зависимостью скорости прихода сигнала от условий на трассе. Установлена и объяснена линейная зависимость длительности инфразвукового сигнала от протяженности трассы. Чем она больше, тем больше длительность регистрируемого сигнала вследствие дисперсии.

Для всех трасс установлены дисперсионные зависимости, т. е. зависимости скорости прихода от периода составляющих в спектре инфразвукового сигнала. Все эти зависимости являются возрастающими

функциями. Отношение v/v и v имеют тенденцию к уменьшению, что обусловлено сужением спектра инфразвукового сигнала (уменьшением количества мод в приземном волноводе).

ВЫВОДЫ

1. В спектре инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом, содержались составляющие с периодом от 20...30 до 80...100 с.

2. Скорость прихода инфразвука в зависимости от трассы изменялась от 239 м/с (для западной по отношению к эпицентру взрыва станции) до 310 м/с (для восточной станции). Учет западного ветра привел к значениям этих скоростей 269 и 279 м/с соответственно. Для южных станций скорректированное значение скорости составляло 292...304 м/с.

3. Оцененная из наблюдений инфразвука скорость западного ветра примерно равна 31 м/с, что близко к скорости, полученной из метеонаблюдений.

4. Установлена линейная зависимость длительности инфразвукового сигнала от длины трассы. Оценена продолжительность излучения инфразвукового сигнала (около 4 мин).

5. Получены экспериментальные дисперсионные зависимости (зависимости скорости прихода спектральных составляющих инфразвукового сигнала от их периода).

6. Обнаружена и объяснена тенденция к уменьшению v/v и v при увеличении длины трассы.

Авторы благодарны коллективу Международного центра данных Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний за предоставление первичных данных наблюдений на станциях IS27, IS31 и IS46.

1. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П. и др. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. — М.: ФГБУ ИПГ, 2013.—37 с.
2. Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль: Матер. Междунар. научно-практическая конф. (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). — Челябинск: Край Ра, 2013.—168 с.
3. *Астрономический вестник* (тематический выпуск).—2013.— 47, № 4.
4. Голицын Г. С., Докучаев В. П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1977.—13, № 9.—С. 926—936.
5. Гохберг М. Б., Ольшанская Е. В., Стеблов Г. М., Шалимов С. Л. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS // Докл. Акад. наук.—2013.—452, № 2.—С. 208—212.
6. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года // *Астрон. вестник*.—2013.—47, № 4.—С. 262—277.

7. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение // Радиофизика и радиоастрономия.—2008.—**13**, № 4.—С. 270—322.
8. Ляцук О. І., Андрущенко Ю. А., Гордієнко Ю. О. та ін. Можливість використання даних інфразвукового моніторингу під час ідентифікації природи сейсмічних подій // Геофиз. журн.—2015.—**37**, № 6.— С. 105—113.
9. Метеорит Челябинск — год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф. / [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, 2014.—694 с.
10. Пасечник И. П. Наука доказала: ядерные взрывы можно обнаружить, где бы они ни производились // Природа.—1962.—№ 7.—С. 3—12.
11. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С. и др. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных // Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. тр. ИДГ РАН. — М.: Геос, 2013.—Вып. 4.—С. 1—10.
12. Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А. и др. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям // Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. тр. ИДГ РАН. — М.: Геос, 2013.—Вып. 4.—С. 21—31.
13. Сорокин А. Г. Об инфразвуковом излучении Челябинского метеороида // Распространение радиоволн. РРВ-24: Тр. XXIV Всероссийской науч. конф., Иркутск, 29 июня — 5 июля 2014 г. / Науч. ред. В. И. Куркин. — Иркутск, 2014.—Т. III.—С. 242—245.
14. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия.—2008.—**48**, № 5.—С. 681—702.
15. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2011.—**51**, № 1.—С. 119—132.
16. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф: монография. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012.—556 с.
17. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль: Матер. Междунар. научно-практической конф. (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). — Челябинск: Край Ра, 2013. — С. 148—152.
18. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // Инженерная физика.—2013.—№ 8. —С. 23—40.
19. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Радиофизика и электроника.—2013.—**4** (18), № 3.—С. 47—54.
20. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // Доп. Нац. акад. наук України.—2013.—№ 10.—С. 97—104.
21. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования // Метеорит Челябинск — год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф. / редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, 2014.—С. 229—264.
22. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрономия.—2014.—**54**, № 5.—С. 658—669.
23. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия.—2015.—**55**, № 3.—С. 370—385.
24. Черногор Л. Ф. Акустический эффект Челябинского метеороида // 15th Ukrainian conference on space research. Odesa, Ukraine. 24—28 August 2015. Abstracts. — Kyiv, 2015.—Р. 149.
25. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела // Кинематика и физика небес. тел.—2014.—**30**, № 3.—С. 27—42.

26. Черногор Л. Ф., Гармаиш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита «Челябинск» // Радиофизика и радиоастрономия.—2013. —**18**, № 3.—С. 231—243.
27. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита // Космічна наука і технологія.—2013.—**19**, № 6.—С. 38—46.
28. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage // Probl. Atomic Sci. and Technology.—2013.—**86**, N 4.—P. 136—139.
29. Edwards W. N. Meteor generated infrasound: theory and observation. — Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010.—P. 361—414.
30. Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves // Atmos. Solar-Terr. Phys.—2006.—**68**.—P. 1136—1160.
31. Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N., Silber E. A. Infrasound production by bolides: A global statistical study // Atmos. Solar-Terr. Phys.—2012.—**80**.—P. 208—229.
32. Grigoryan S. S., Ibadov F. S., Ibadov S. I. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion // Solar System Res.—2013.—**47**, N 4.—P. 268—274.
33. Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., et al. Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors // Geophys. Res. Lett.—2013.—**40**, N 14.—P. 3732—3737.
34. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization // Science.—2013.—**342**.—P. 1069—1073.
35. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1>.
36. Reed J. Airblast overpressure decay at long ranges // J. Geophys. Res.—1972.—**77**.—P. 1623—1629.
37. ReVelle D. O. On meteor-generated infrasound // J. Geophys. Res.—1976.—**81**.—P. 1217—1231.
38. Silber E. A., LePichon A., Brown P. G. Infrasound detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009 // Geophys. Res. Lett.—2011.—**38**, N 12.—P. L12201.
39. Silber E., ReVelle D. O., Brown P., Edwards W. An estimate of the terrestrial in flux of large meteoroids from infrasonic measurements // J. Geophys. Res.—2009.—**114**.—P. 1—8.

Статья поступила в редакцию 20.03.16