

УДК 551.558, 551.596, 534.221

**Л. Ф. Черногор<sup>1</sup>, А. И. Лящук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина  
пл. Свободы 4, Харьков, 61022  
e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

<sup>2</sup>Главный центр специального контроля НЦУИКС  
Государственного космического агентства Украины, пгт. Городок, Украина

### **Инфразвуковые наблюдения взрыва болида над Румынией 7 января 2015 г.**

*По данным ряда инфразвуковых станций, расположенных в Европе, обнаружены проявления взрыва Румынского метеороида. Оценены азимут, скорость прихода, длительность, амплитуда и энергия инфразвукового сигнала. Обсуждается состав, масса, объем и размеры метеороида.*

*ІНФРАЗВУКОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ВИБУХУ БОЛІДА НАД РУМУНІЄЮ 7 СІЧНЯ 2015 р. Черногор Л. Ф., Лящук О. І. — За даними низки інфразвукових станцій, розташованих у Європі, виявлено прояви вибуху Румунського метеороїда. Оцінено азимут, швидкість приходу, тривалість, амплітуду й енергію інфразвукового сигналу. Обговорюється склад, маса, об'єм і розміри метеороїда.*

*INFRA-SOUND OBSERVATIONS OF THE BOLIDE EXPLOSION OVER ROMANIA ON JANUARY 7, 2015, by Chernogor L. F., Liashchuk O. I. — Manifestations of the Romania meteoroid explosion have been detected in the infrasound data acquired at a few infrasound stations in Europe. The azimuth angle of arrival, celerity, duration, amplitude, and energy of the infrasound signal has been estimated. The composition, mass, volume, and the dimensions of the meteoroid are discussed.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ эффектов, сопровождающих вторжение достаточно крупных космических тел в атмосферу Земли, представляет значительный интерес для кинематики и физики небесных тел, а также для физики ат-

**Таблица 1.** Параметры метеороидов и средний интервал времени между двумя падениями (плотность вещества —  $3.3 \text{ т/м}^3$ , начальная скорость —  $20 \text{ км/с}$ ), рассчитанный по формуле из работы [11] (в скобках — по формуле из [2])

$d_0$ , м	$m$ , т	$E_{k0}$ , кг ТНТ	$t_0$ , год
0.3	0.047	0.0023	0.001 (0.0002)
1	1.7	0.083	0.027 (0.005)
2	13.8	0.66	0.18 (0.032)
3	46.7	2.2	0.5 (0.096)
5	216	10.4	2.1 (0.38)
10	1700	83	13.6 (2.36)
15	5800	278	40.5 (7.06)
20	14000	672	88 (15.5)

мосферы [1, 21, 26]. Хорошо задокументированные факты падения космических тел дают ценную информацию об их орбитах, траекториях в атмосфере, химическом составе, структуре, массе, размерах, скорости, истории, особенностях дробления, особенностях инфразвуковых и сейсмических эффектов. Наряду с оценкой параметров метеороида и метеорита удастся уточнить также параметры атмосферы.

Для наблюдения вторжений крупных космических тел в атмосферу Земли используются геостационарные ИСЗ, предназначенные для контроля космического пространства, принадлежащие Департаменту обороны США (US DoD), средства Международной системы мониторинга ядерных испытаний, средства геофизических обсерваторий, многочисленные видеорегистраторы. Наиболее ценную информацию о параметрах метеороидов дают измерения мощности световой вспышки, регистрации наземных микробарографов и сейсмографов, а также телевизионных камер.

Космические тела систематически вторгаются в атмосферу Земли. На частоту падения (интервал времени  $t_0$  между падениями) существенно влияет значение начальной кинетической энергии  $E_{k0}$  (размера  $d_0$ ) тела (табл. 1). Из табл. 1 видно, что параметры метеороидов изменяются в широких пределах. Нет двух одинаковых метеороидов. По этой причине актуальной задачей является детальный анализ эффектов, вызванных падением каждого задокументированного космического тела. Зависимость  $t_0(E_{k0})$  приведена в работе [14]. Иная зависимость частоты падения от массы космического тела содержится в работе [2].

Примеры падения метеороидов, хорошо описанные в литературных источниках, перечислены в табл. 2. Лучше других событий изучено падение малого метеороида Моравка (Чешская республика) 6 мая 2000 г. [7—9, 11]. Его масса составляла  $1.5 \cdot 0.5 \text{ т}$ , диаметр  $d_0 = 0.8 \dots 1.1 \text{ м}$ , начальная кинетическая энергия  $E_{k0} = 0.09 \dots 0.03 \text{ кг ТНТ} = (3.77 \dots 1.26) \cdot 10^{11} \text{ Дж}$ .

**Таблица 2.** Общие сведения о болидах метрового размера (координаты в скобках из работы [29]). Здесь — начальный угол наклона траектории к горизонту,  $z_e$  — высота максимальной вспышки,  $v_0$ ,  $m_0$ ,  $E_{k0}$  — начальные значения скорости, массы и кинетической энергии космического тела

Дата, время UT	Широта, долгота		$z_e$ , км	$v_0$ , км/с	$m_0$ , т	$E_{k0}$ , кт ТНТ / $E_r$ , кт ТНТ	Литерат. источник
19.01.1993 00:33:29	44.48±0.01°N 11.91±0.01°E	5±0.3°	30±3	18±3	400±100	16±4 / 14±2	[16, 17, 19]
01.02.1994 22:38:09	2.6°N 164.1°W	45°	34	24	190	13.2 / 1.7	[25]
14.06.1994 00:02:26	45.84±0.01°N 73.06±0.01°W	58±3°	36	13.0±0.3	2	0.03 / 0.003	[10, 21]
18.01.2000 16:43		18°	29	15.8±0.6	56	1.66±0.70 / 0.26	[12]
06.05.2000 11:51:46	50°N 18.5°E	20.4 ±0.2°	33±4	22.5±0.3	1.5±0.5	0.09±0.03 / 0.006	[7—9, 11]
25.08.2000	14.5°N 106.1°W					3.3 / 0.33	[15]
29.12.2000 10:00	17.5°S 149.5°W	30°	45	15...17	1.5...150	0.01...0.3 / 0.06...4	[23]
23.04.2001	27.9°N 113.9°W					11 /	[15]
27.03.2003 05:50	41.6°N 87.7°W	29°	18	19.5±0.3	11±3	0.5 / 0.035	[12]
04.01.2004 16:46:45	42.8°N 5.4°W	29.0±0.6°	28±0.2	17	0.76±0.15	0.026±0.005/	[24, 33]
03.06.2004 09:40:14	48°N 122°W		39.3±7				[6]
07.01.2015 01:05:56	45.7°N (45.75°N) 26.9°E (26.63°E)	59.6	45.5	42.4	1.9	0.4 / 0.03	[29]

Другим примером падения крупного метеороида (малого астероида) является Челябинское космическое тело [5, 28], см. также [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1]. Событие имело место 15 февраля 2013 г. в районе г. Челябинск (Российская Федерация). Масса метеороида составляла около 11 тыс. т, диаметр — около 18 м, а кинетическая энергия — около 440 кт ТНТ =  $1.8 \cdot 10^{15}$  Дж.

Примеры крупнейших метеороидов, зарегистрированных Европейской сетью, приведены в работе [1]. Ряд событий описано в работах [6—10, 11—13, 15, 16—19, 21, 23—25, 33]. Наиболее полный перечень метеороидов представлен на сайте НАСА [http://neo.jpl.nasa.gov/fireball].

Метеороид, который условимся называть Румынским, вторгшийся в атмосферу Земли над Румынией 7 января 2015 г., по своим параметрам несколько превосходит параметры метеороида Моравка, однако ему уделено незаслуженно мало внимания. Авторам известна лишь одна работа [29], в которой описаны траектория, скорость и элементы орбиты космического тела.

Цель настоящей работы — изложение результатов наблюдений взрыва Румынского метеороида при помощи сети инфразвуковых станций, размещенных в Европе.

Румынский метеороид имеет ряд замечательных отличий. Во-первых, его падение имело место в Центральной Европе, где находится сравнительно плотная сеть инфразвуковых станций, сейсмографов и видеорегистраторов. Во-вторых, его скорость превышала 35 км/с, в то время как для большинства метеороидов она была около 20 км/с и даже меньше. В-третьих, вторжение в атмосферу и взрыв метеороида имел место в сейсмоактивном районе — в Карпатских горах. Последнее обстоятельство затруднило использование данных сейсмографов.

Частота падения тел, подобных Румынскому метеороиду, как показывают оценки по соотношению из работы [14], весьма велика — до 9 событий в год. В то же время оценки по формуле из книги [2] составляют около 182 событий в год, что сильно превышает частоту падений по сравнению с данными НАСА [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireball>].

Оценка по формуле из работы [14], на первый взгляд, занижает эту частоту, но реальное уменьшение частоты связано со значительным превышением скорости Румынского метеороида по сравнению со скоростью типичного метеороида (20 км/с).

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТЕОРОИДЕ

Пролёт и взрыв Румынского метеороида был зарегистрирован при помощи спутниковой системы контроля космического пространства США [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireball>] и ряда наземных видеорегистраторов [29]. Примеры снимков приведены на рис. 1. Событие имело место 7 января 2015 г. в 01:05:56 (здесь и далее время UT). По данным НАСА [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireball>] энергия вспышки составляет  $E_r = 136 \cdot 10^{11}$  Дж = 32.5 т ТНТ. Знание  $E_r$  позволяет рассчитать эффективность светимости [1, 14]

$$\eta_r = 0.1212 E_r^{0.115},$$

где  $E_r$  дается в килотоннах ТНТ, и начальную кинетическую энергию космического тела  $E_{k0} = E_r / \eta_r$ . Оказалось, что  $\eta_r = 8.2 \%$ , а  $E_{k0} = 1.66 \cdot 10^{12}$  Дж = 0.4 кт ТНТ.

Географические координаты точки входа метеороида в плотные слои атмосферы (высота 111.41 км) составляли 45.4° N, 26.33° E [29]. Координаты точки взрыва и ее высота составили 45.75° N, 26.63° E и  $z_e = 42$  км по данным [29] и 45.7° N, 26.9° E,  $z_e = 45.5$  км — по данным НАСА [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireball>]. Далее в расчетах используются данные НАСА. Азимут траектории был около 210.75° [29]. Угол наклона траектории к горизонту при входе в атмосферу = 59.6° [29]. При указанных высотах точки входа и конечной точки светящейся траектории была близка к 80 км.



Рис. 1. Три последовательных фотографии Румынского болида (на фото указано местное время)

По данным НАСА модуль начальной скорости равнялся  $v_0 = 35.7$  км/с.

По величине  $E_r$  также можно оценить максимальную мощность  $P_{\max}$  вспышки. Эффективная длительность вспышки равна

$$t_e = \frac{L_e}{v_0} = \frac{H}{2v_0}, \quad (1)$$

где  $L_e = H/2$  — эффективная протяженность вспышки (на этом расстоянии, как показали модельные расчеты авторов, выделяется около 90 % энергии метеороида),  $H = 7.5$  км — высота однородной атмосферы. Из (1) следует, что  $t_e = 0.1$  с. При  $E_r = 0.5P_{\max} t_e$  и  $t_e = 0.1$  с имеем  $P_{\max} = 2E_r/t_e = 2.7$  ТВт.

## СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Для наблюдений инфразвукового эффекта Румынского метеороида использовались три украинские станции и по одной станции, размещенных в России, Германии и Румынии (табл. 3).

Геофизическая сеть Главного центра специального контроля (Украина) располагает малоапертурными акустическими группами (МАОГ) [3]. МАОГ1 представляет собой трехэлементный массив микробарографов, размещенных вблизи с. Ворсовка, Малинского района Житомирской области. Конфигурация элементов МАОГ1 имеет форму равностороннего треугольника. МАОГ2 представляет собой четырехэлементный массив микробарографов, размещенный вблизи с. Ластовцы Каменец-Подольского района Хмельницкой области. Конфигурация элементов имеет форму равностороннего треугольника с четвертым элементом в центре треугольника. Однокомпонентная акустическая станция BALAM размещена в г. Балта Одесской области.

**Таблица 3. Параметры инфразвуковых станций и инфразвукового сигнала (в скобках для координат из работы [29])**

Параметр	Инфразвуковая станция					
	IPLOR (Румыния)	МАОГ2 (Украина)	BALAM (Украина)	МАОГ1 (Украина)	I26DE (Германия)	I43RU (Россия)
Широта станции	45.85°N	48.56°N	47.94°N	50.70°N	48.90°N	56.7°N
Долгота станции	26.65°E	26.46°E	29.60°E	29.22°E	13.70°E	37.3°E
Максимальное значение коэффициента корреляции	0.81	0.93	–	0.78	0.77	0.69
Оцененный азимут болида	148.1°	180.1°	–	190°	104.6°	206°
Реальный азимут болида	130.6° (187.9°)	173.8°	223°	198.1°	104.4°	214.5°
Момент прихода сигнала	01:08:24	01:24:02 01:26:20 01:27:22	01:23:30	01:39 01:42	02:09:47 02:10:48 02:12:42 02:14:36	02:26:45
Время запаздывания сигнала, мин	2.8	18 20 21.5	17.6 18.6 20.9	33 36	64 65 67 69	81
Расстояние от области взрыва до станции, км	53	313	332	583	1034	1423
Скорость прихода сигнала, м/с	281	289 261 243 317 296 263	293 269	269 265 257 250	293	
Длительность сигнала, мин	~0.1	0.3 0.6 1.0	0.2 0.4...0.9 0.2...0.3	0.9 0.4	0.9...1.7 1.3 0.8...1.0	2.3
Максимальная амплитуда, Па	50	3...4	3...4	0.5...1	1...1.5	0.5...0.6
Квазипериод, с	–	3.3 4.8	3.8	3.5	4.5	3.2

Для уменьшения роли акустических помех, вызванных ветром и турбулентностью воздуха, ко входу каждого микробарографа на МААГ через объем усреднения подключено помехозащитное устройство типа «паук» [3], а в случае однокомпонентной станции — устройство «коническая труба».

Диапазон рабочих частот МААГ составляет 0.003...12 Гц, диапазон давлений — 0...100 Па [3].

Инфразвуковая станция IPLOR (Плоштина, Вранча, Румыния) представляет собой 6-элементный массив микробарографов Chaparral Physics Model 25. Конфигурация элементов имеет форму двойного треугольника (треугольника в треугольнике). Расстояние между элементами внешнего треугольника составляет около 2.5 км, внутреннего — 500 м. Амплитудно-частотная характеристика микробарографов плоская для частот 0.08...200 Гц на уровне  $-3$  дБ и 0.2...50 Гц для  $-0.5$  дБ. Чувствительность задается извне на уровне 2 В/Па в диапазоне 0...20 Гц, либо 0.4 В/Па.

Инфразвуковые станции России и Германии входят в состав Международной системы мониторинга ядерных испытаний. Элементы инфразвуковой станции I43RU (Дубна, Россия) расположены в форме равностороннего треугольника с четвертым элементом в центре треугольника, апертура около 1.5 км. Одна из вершин треугольника состоит из малого треугольника, расстояние между элементами в нем составляет 150 м.

Германская станция I26DE имеет форму квадрата с центральным пятым элементом. Расстояние между вершинами составляет около 2 км. Станции оснащены помехозащитными устройствами. В качестве акустических систем используются инфразвуковые станции MB2000. Диапазон рабочих частот — 0.001...20 Гц, чувствительность датчика — 20 мВ/Па, диапазон давлений равен  $\pm 500$  Па. Динамический диапазон составляет 108 дБ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

**Румынская станция.** Станция IPLOR размещена на расстоянии около 13 км от эпицентра взрыва (Под эпицентром понимают проекцию по вертикали точки взрыва на земную поверхность). Ее удаление от области взрыва составляло около 53 км. Вариации давления  $p$ , зарегистрированные на шести микробарографах румынской инфразвуковой станции IPLOR, приведены на рис. 2 [20] (см. также [http://www.infr.ro/wp-content/uploads/2015/01/meteorit\\_5.jpg](http://www.infr.ro/wp-content/uploads/2015/01/meteorit_5.jpg)). Видно, что реакция на взрыв метеороида имела две фазы — фазу сжатия (знак «+») и фазу разрежения (знак «-»). (В канале IPH4 отклонения давления от невозмущенного значения инвертированы.) Значительное увеличение  $p$  с амплитудой  $p = 50$  Па и длительностью  $t = 1.5...2$  с возникло в 01:08:43, т.е. с запаздыванием  $t = 167$  с по отношению к моменту

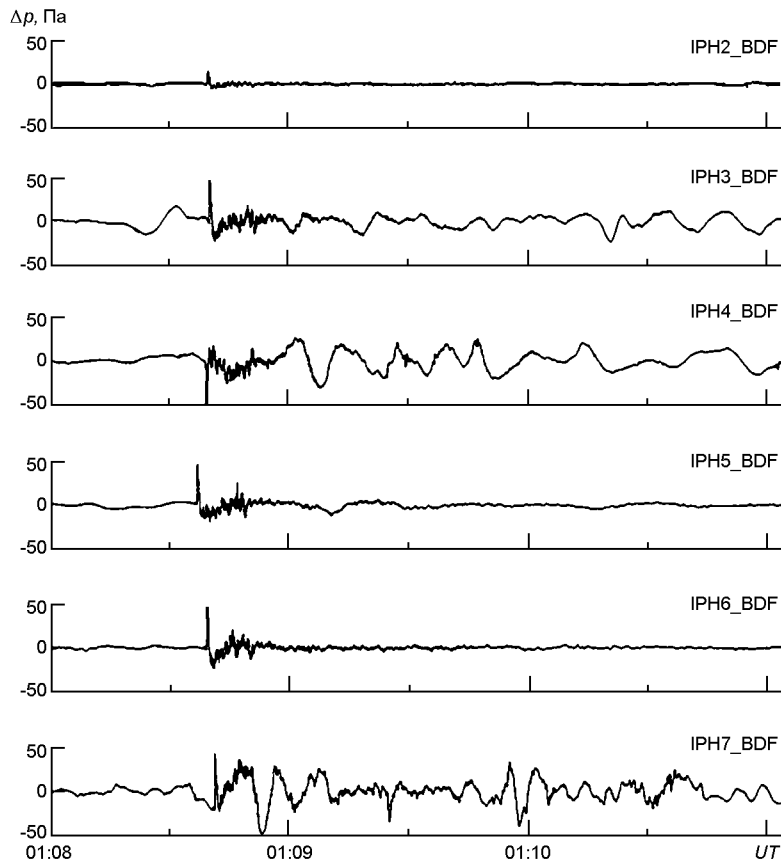


Рис. 2. Временные вариации уровня инфразвукового сигнала, зарегистрированные шестью каналами румынской многоканальной инфразвуковой станции IPLOR ( $R = 53$  км) [http://www.infp.ro/wp-content/uploads/2015/01/meteorit\_5.jpg]

взрыва метеороида. Для фазы разрежения  $p = 10 \dots 14$  Па,  $\tau = 4 \dots 5$  с. Начало сигнала напоминало импульс Гласстоуна длительностью 6...7 с. Такие вариации давления свойственны взрывным процессам. После импульса Гласстоуна отмечались колебания давления с периодом 20...30 с. Далее в канале IPH7 наблюдалось менее интенсивное квазипериодическое возмущение с периодом  $T = 7 \dots 10$  с. Это возмущение, возможно, сгенерировано цилиндрической ударной волной, возникшей на высотах 70...50 км. На высотах 50...42 км имело место сложение цилиндрической и взрывной (почти сферической) ударных волн. Общая продолжительность возмущения, по-видимому, не превышала 100 с. При расстоянии  $R = 53$  км и запаздывании в 167 с скорость прихода ударной волны равна  $v = 317$  м/с.

**Украинские станции.** Временная зависимость уровня флуктуаций давления с амплитудой 3...4 Па на станции BALAM приведена на рис. 3, из которого видно, что заметное (в 2...20 раз) увеличение амплитуды имело место в интервалах времени 01:23:33 — 01:23:57,



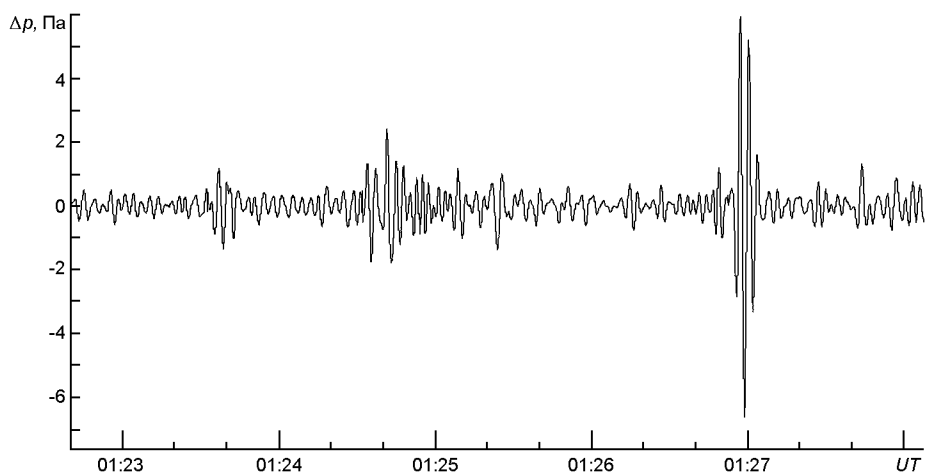


Рис. 3. Временные вариации уровня инфразвукового сигнала, зарегистрированные украинской одноканальной инфразвуковой станцией BALAM ( $R = 332$  км)

01:24:32 — 01:25:54 и 01:26:52 — 01:27:06. Этим увеличениям соответствовали времена запаздывания 17.6, 18.6 и 20.9 мин и скорости прихода 313, 296 и 263 м/с.

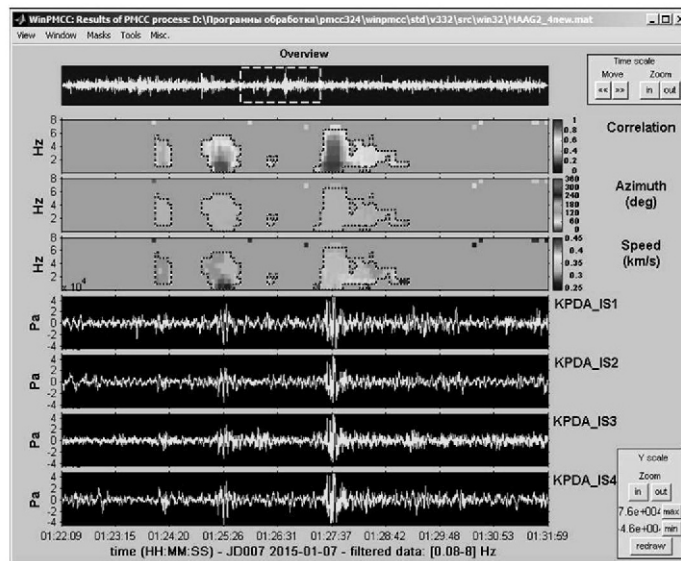
Наличие нескольких времен запаздывания свидетельствует о разных траекториях распространения сигнала. Наименьшему времени соответствует самая короткая траектория, когда сигнал приходит в точку приема непосредственно от области взрыва. При больших временах запаздывания волна сначала распространяется до верхней стенки волновода, а затем поворачивает к поверхности Земли [22]. В зависимости от угла падения на стенку волновода изменяется и время задержки сигнала.

Временные зависимости уровня флуктуаций давления на часовом интервале времени, усредненного коэффициента попарной корреляции амплитуд сигналов в различных каналах, азимута и скорости прихода акустического сигнала, а также уровня флуктуаций давления на десятиминутном интервале времени приведены на рис. 4 (графики сверху вниз). Из рис. 4, *а* видно, что заметное увеличение коэффициента корреляции имело место в интервалах времени 01:24:02 — 01:24:20, 01:26:20 — 01:26:40 и 01:27:22 — 01:27:58. Незначительные всплески сигнала за несколько минут до всплеска в 01:24:02 — 01:24:20 не могли быть связаны с метеороидом, так как коэффициент корреляции был равен нулю, отсутствовала и оценка азимута — скорее всего этим сигналом была местная помеха. Указанным увеличениям коэффициента корреляции соответствовали времена запаздывания 18, 20 и 21.5 мин и скорости прихода 296, 267 и 248 м/с.

Оцененный азимут составлял около  $180^\circ$  (см. рис. 4, *б*).

Далее описаны результаты наблюдений на более удаленных инфразвуковых станциях. При этом  $R = 583...1423$ , и отношение сиг-

а



б

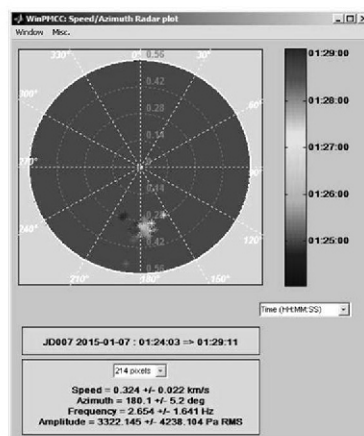
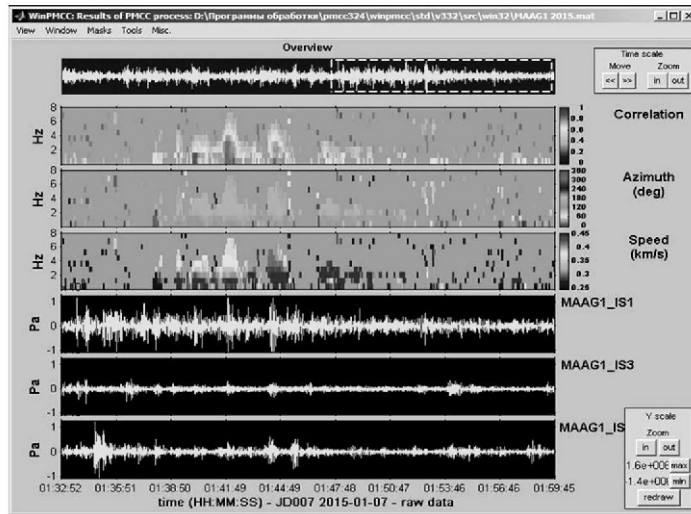


Рис. 4. Временные вариации уровня инфразвукового сигнала, зарегистрированные украинской многоканальной инфразвуковой станцией МААГ2 ( $R = 313$  км): а — сверху вниз — общий вид регистрации в интервале времени с 01:00 до 02:00, временные вариации коэффициента корреляции, азимута, скорости прихода и уровня инфразвукового сигнала в четырех каналах в интервале времени с 01:22:09 до 01:31:59; б — экран индикатора кругового обзора источников инфразвука

нал/шум было заметно ниже (1.5...3). Последнее определило довольно низкие значения коэффициента корреляции сигнала в различных каналах, а также низкую точность оценки азимута и скорости прихода.

Те же зависимости, зарегистрированные на станции МААГ1, приведены на рис. 5, из которого видно, что наибольшее увеличение амплитуды флуктуаций давления до 1 Па имело место в канале IS1 в ин-

а



б

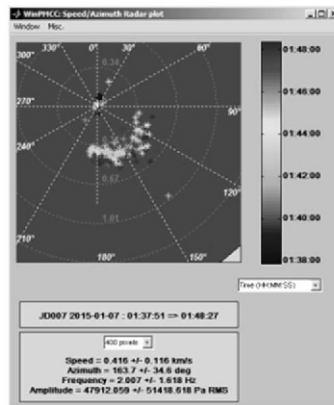
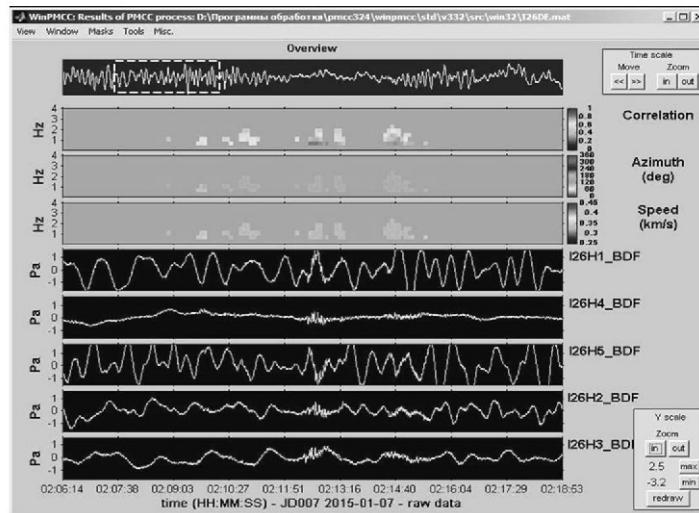


Рис. 5. Временные вариации уровня инфразвукового сигнала, зарегистрированные украинской многоканальной инфразвуковой станцией МААГ1 ( $R = 583$  км): а — сверху вниз — общий вид регистрации в интервале времени с 01:00 до 02:00; временные вариации коэффициента корреляции, азимута, скорости прихода и уровня инфразвукового сигнала в трех каналах в интервале времени с 01:32:52 до 01:59:45; б — экран индикатора кругового обзора источников инфразвука

тервале времени 01:33:26 — 01:51:28. При этом время запаздывания  $t = 27.5$  мин, а скорость прихода  $v = 350$  м/с. Важно, что в этом интервале времени коэффициент корреляции был равен нулю, а значит, этот всплеск не имел отношения к метеороиду и был связан с местной помехой. Если же время запаздывания оценивать по максимуму коэффициента корреляции, то  $t = 33$  мин,  $v = 293$  м/с, а длительность сигнала  $T = 200$  с. Заметное увеличение коэффициента корреляции также отмечалось в 01:42 и длилось около 114 с. При этом  $v = 269$  м/с. Значение азимута было весьма неопределенным: от 120 до 200 .

а



б

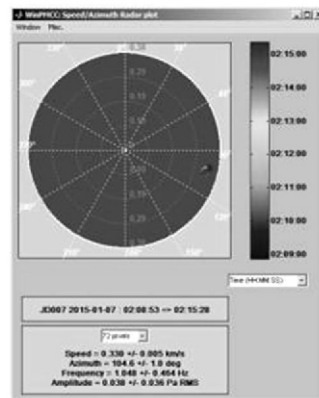
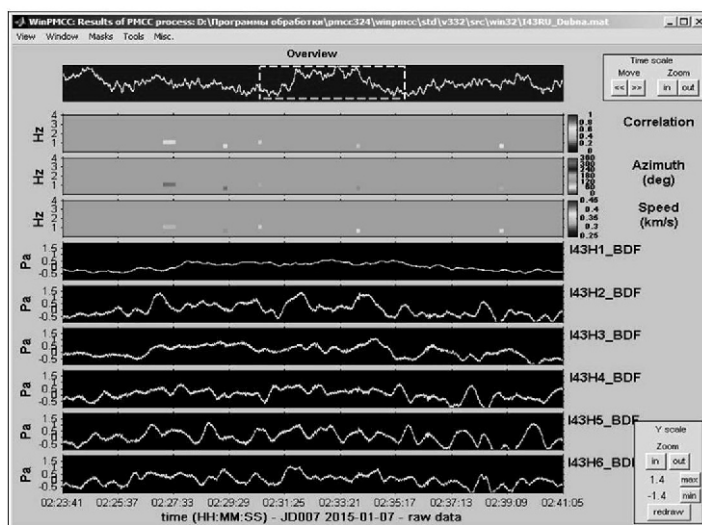


Рис. 6. Временные вариации уровня инфразвукового сигнала, зарегистрированные германской многоканальной инфразвуковой станцией I26DE ( $R = 1034$  км): а — сверху вниз — общий вид регистрации в интервале времени с 02:00 до 03:00; временные вариации коэффициента корреляции, азимута, скорости прихода и уровня инфразвукового сигнала в четырех каналах в интервале времени с 02:06:14 до 02:18:53; б — экран индикатора кругового обзора источников инфразвука

**Германская станция.** Временные зависимости уровня флуктуаций давления с амплитудой до 1...1.5 Па, скорости и азимута прихода акустического сигнала, а также коэффициента корреляции приведены на рис. 6. Видно, что коэффициент корреляции принимал наибольшие значения примерно в 02:09:47, 02:10:48, 02:12:42 и 02:14:36. Из-за увеличения расстояния число возможных откликов (число лучей, пришедших по различным траекториям) увеличивается. Длительности всплесков значений коэффициента корреляции составляли 15...30 с.

а



б

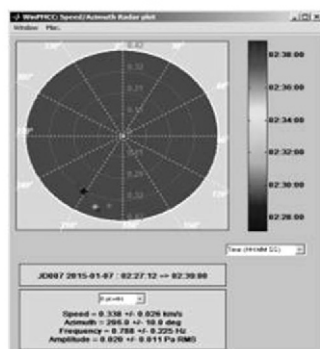


Рис. 7. Временные вариации уровня инфразвукового сигнала, зарегистрированные российской многоканальной инфразвуковой станцией I46RU ( $R = 1423$  км): а — сверху вниз — общий вид регистрации в интервале времени с 02:00 до 03:00; временные вариации коэффициента корреляции, азимута, скорости прихода и уровня инфразвукового сигнала в четырех каналах в интервале времени с 02:23:41 до 02:41:06; б — экран индикатора кругового обзора источников инфразвука

Указанным временам прихода акустического сигнала соответствовали времена запаздывания около 64, 65, 67 и 69 мин и скорости прихода 274, 270, 262 и 254 м/с. Оцененный азимут составлял около 104°.

**Российская станция.** Те же зависимости для российской станции приведены на рис. 7. Видно, что увеличение амплитуды давления до 0.5...0.6 Па началось в 02:26:45 и закончилось в 02:36:16. При этом  $t = 81$  мин,  $v = 292$  м/с,  $T = 12.5$  мин. По оценке азимут составлял около 206°.

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Кинематика и химический состав метеороида.** Насколько известно авторам, фрагменты Румынского метеороида на сегодняшний день не найдены. Поэтому точный состав метеороида неизвестен. Однако данные о его траектории позволяют оценить класс космического тела.

По химическому составу метеороиды делят на три класса: железные, железо-каменные, каменные. Кроме того, существуют «рыхлые тела» («пылевые шары», «кометное вещество»), где лед является скрепляющим материалом.

Только 5-6 % космических тел являются железными. Самым ярким представителем метеоритов этого класса является Сихотэ-Алинский метеорит, упавший в 10:38 по местному времени 12 февраля 1947 г. в западных отрогах Сихотэ-Алиня (Россия) [1]. Свыше 90 % космических тел являются каменными, точнее хондритами. Ледяные тела («кометное вещество») обычно испаряются при торможении в атмосфере и не достигают поверхности Земли.

Большинство космических тел не являются монолитными, а содержат много трещин. Из-за этого их эффективная прочность заметно ниже прочности чистого (монолитного) вещества [27].

Высоту существенного разрушения можно оценить из следующего соотношения [1]:

$$0.365 \rho_a(z) v_0^2 \leq \sigma_{\text{эфф}}, \quad (2)$$

где  $\rho_a$  — плотность атмосферы, где имело место разрушение метеороида. При экспоненциальной зависимости  $\rho_a(z)$  имеем

$$\rho_a(z) = \rho_a(0) e^{-z/H}, \quad (3)$$

где  $\rho_a(0) = 1.3 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха на поверхности Земли. Тогда из (2) и (3) следует, что

$$z \leq H \ln \frac{0.365 \rho_a(0) v_0^2}{\sigma_{\text{эфф}}}. \quad (4)$$

Высота  $z_1$  соответствует минимальному значению  $\sigma_{\text{эфф}}$ , а высота  $z_2$  — максимальному значению  $\sigma_{\text{эфф}}$  (табл. 4). Добавим, что высота  $z_2$  не совпадает с высотой максимального торможения (взрыва), она несколько меньше последней. Важно, что минимальное значение  $\sigma_{\text{эфф}}$  для разных метеороидов составляло 0.03...1 МН/м<sup>2</sup>, а максимальное — 1...10 МН/м<sup>2</sup> [27].

Возможные параметры Румынского метеороида в зависимости от его структуры приведены в табл. 4. Расчет  $z_1$  и  $z_2$  выполнен по формуле (4). Видно, что чем больше объемная плотность метеороида, тем больше его эффективная прочность и тем меньше высота начала его существенного разрушения  $z_1$  и высота окончания разрушения  $z_2$ . Фрагменты железного и железо-каменного метеороидов достигают поверхности Земли. Каменные метеороиды могут полностью расплываться в атмосфере либо достигать поверхность Земли. Кометные тела

**Таблица 4.** Возможные параметры Румынского метеороида в зависимости от его структуры. Считалось, что  $v_0 = 35.7$  км/с

Метеороид	$\rho, \text{т/м}^3$	$\sigma, \text{МН/м}^2$	$z_1, \text{км}$	$z_2, \text{км}$	$V, \text{м}^3$	$d, \text{м}$
Железный	7.7	10...100	0.9	0	0.34	0.86
Железо-каменный	4.7...5.6	3...30	40	0	0.46...0.55	0.96...1.02
Каменный	3.3...3.6	1...10	48	31	0.72...0.79	1.11...1.15
Кометное вещество	0.9	0.01...0.1	83	66	2.89	1.77

начинают существенно разрушаться на высотах приблизительно 85 км и никогда не достигают поверхности Земли. Примерами таких метеороидов могут быть космические тела, вторгшиеся в атмосферу Земли в 11:34:30 31 октября 2015 г. ( $z_2 = 71$  км), в 17:43:03 10 июня 2015 г. ( $z_2 = 61.1$  км), в 18:08:02 12 августа 2013 г. ( $z_2 = 66.6$  км), в 02:54:07 9 декабря 2010 г. ( $z_2 = 66.0$  км) и в 01:45:29 3 апреля 2005 г. ( $z_2 = 59.2$  км) [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireball>].

По нашим оценкам Румынский метеороид начал светиться на высоте около 111 км, а закончил — на высоте около 37 км. Близкие данные упоминаются в работе [29]. Как следует из табл. 4, метеороид был, скорее всего, каменным. Поскольку он разрушился на высоте около 46 км, где  $\rho = 12 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, его прочность, по-видимому, не превышала  $0.6$  МН/м<sup>2</sup>. Заметная фрагментация возможна уже при  $\sigma = 0.5$  МН/м<sup>2</sup> [27], т. е. вблизи высоты  $z_1 = 48$  км. На высотах  $z < z_1$  следовало ожидать прогрессивной фрагментации, в результате которой поперечная скорость  $v_t = dr_t / dt$  обломков увеличивалась с уменьшением высоты примерно по такому закону [1]:

$$v_t = \frac{dr_t}{dt} = kv \frac{\rho_a(z)^{1/2}}{\rho_a(z_1)^{1/2}}, \quad (5)$$

где  $r_t$  — радиус облака обломков,  $\rho_a$  — плотность космического тела,  $k = 0.17...1.5$  [24]. При

$$\frac{dr_t}{dt} = \frac{dr_t}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{dr_t}{dz} v \sin \alpha, \quad (6)$$

$$\rho_a(z) = \rho_a(z_1) \exp \left( -\frac{z - z_1}{H} \right)$$

для диаметра облака фрагментов интегрированием (5) с учетом (6) получаем следующее выражение:

$$d_t = 2r_t = d_{tm} (e^{x/2} - 1), \quad (7)$$

где

$$d_{tm} = \frac{4Hk}{\sin \alpha} \sqrt{\rho_a(z_1)}, \quad x = \frac{z - z_1}{H}.$$

При значениях  $k = 1$ ,  $z_1 = 48$  км,  $z_e = 42$  км,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\rho_a(z_1) = 2.2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma = 3.3$  т/м<sup>2</sup>,  $H = 7.5$  км,  $x_e = (z_e - z_1) / H = -0.8$  из (7) имеем  $d_{tm} = 28$  м,  $d_t(z_e) = 14$  м и  $v_t(z_e) = 35$  м/с при  $v(z_e) = 33$  км/с.

Таким образом, вблизи высоты  $z_e$  при  $d_0 = 1.1$  м отношение  $d_t / d_0 = 12.7$ .

Увеличение  $v_t$  и  $d_t$  сопровождалось увеличением площади сечения облака фрагментов и резким увеличением его торможения, что и привело к взрывоподобному выделению энергии. Разумеется, фрагментация сопровождалась и испарением, а также поверхностным терморазрушением, которые детально исследуются в книге [2].

**Масса, объем и размеры метеороида.** Приведенные выше соображения свидетельствуют в пользу того, что метеороид, скорее всего, был каменным с  $3.3...3.6$  т/м<sup>3</sup>. Используя оценки  $E_{k0} = 1.66 \cdot 10^{12}$  Дж и  $v_0 = 35.7$  км/с, получаем начальные значения массы космического тела  $m_0 = 2.6$  т, его объема  $V_0 = 0.72...0.79$  м<sup>3</sup> и диаметра  $d_0 = 111...115$  см (см. табл. 4).

**Акустическая энергия и акустическая эффективность.** В ближней зоне взрыва метеороида, где имеет место сферическая расходимость волны, полная энергия квазипериодического инфразвукового сигнала на расстоянии  $R$  от источника составляет [4]

$$E_a = \frac{2 R^2 \overline{p^2}}{v_s(0)} T, \quad (8)$$

где  $\overline{p^2}$  — среднее квадратичное значение амплитуды инфразвукового колебания длительностью  $T$ ,  $v_s = 330$  м/с — скорость звука у поверхности Земли. При этом объем, занимаемый акустической волной, составляет  $4 R^2 v_s T$ .

Вблизи места взрыва метеороида акустическая волна не является квазипериодической, ее профиль близок к профилю ударной волны. Последняя имеет две фазы — фазу сжатия с амплитудой  $p$  и длительностью  $\tau$ , а также фазу разрежения с амплитудой  $p$  и длительностью  $\tau$ . Тогда

$$E_a = \frac{2 R^2}{v_s(0)} (p^2 \tau + p^2 \tau). \quad (9)$$

Для румынской станции и канала ИРН4 имеем  $p = 50$  Па,  $1.5...2$  с,  $\tau = 10...14$  Па,  $4...5$  с. Тогда при  $R = 53$  км из соотношения (9) получим, что  $E_a = (1.6...2.4) \cdot 10^{11}$  Дж. При этом акустическая эффективность  $\eta_a = E_a / E_{k0} = 9.6...14.5$  %. Для канала ИРН7 значения  $p = 40$  Па,  $\tau = 2$  с. Тогда  $E_a = (1.4...1.5) \cdot 10^{11}$  Дж и  $\eta_a = 8.4...9$  %.

Для украинской станции МААГ2 имеем  $\overline{p^2} = 12$  Па<sup>2</sup>,  $T = 156$  с,  $R = 320$  км. Расчет по формуле (8) дает нереально большое значение  $E_a = 2.9 \cdot 10^{12}$  Дж. Дело в том, что соотношение (8) на расстояниях более 300 км неприменимо. Необходимо учитывать волноводный механизм распространения акустического сигнала в полости стратосфера — Земля, а также в полости термосфера — Земля. Акустическая волна со сферической расходимостью в волноводе постепенно превращает-



ся в волну с цилиндрической расходимостью. При этом вместо формулы (8) необходимо использовать соотношение

$$E_a = \frac{Rh \overline{p^2}}{a(0)v_s} T, \quad (10)$$

где  $h = 40$  км — высота стратосферного волновода (высота термосферного волновода составляет около 140 км) [22]. Соотношение (10) получено из выражения (7) заменой объема  $4 R^2 v_s T$  на объем  $2 Rh v_s T$ . Расчет по формуле (8) дает  $E_a = 1.8 \cdot 10^{11}$  Дж,  $\alpha_a = 11\%$ .

Для украинской станции МААГ1 при  $\overline{p^2} = 1 \text{ Па}^2$  и  $T = 470$  с имеем  $E_a = 8.2 \cdot 10^{10}$  Дж и  $\alpha_a = 4.9\%$ .

Для германской станции в канале I26H1 имеем  $\overline{p^2} = 1 \text{ Па}^2$ ,  $T = 330$  с. Тогда  $E_a = 10^{11}$  Дж и  $\alpha_a = 6\%$ . В канале I26H3 значение  $\overline{p^2} = 0.4 \text{ Па}^2$ . При этом  $E_a = 4.1 \cdot 10^{10}$  Дж и  $\alpha_a = 2.5\%$ .

Для российской станции при  $\overline{p^2} = 0.3 \text{ Па}^2$  и  $T = 750$  с получим  $E_a = 9.6 \cdot 10^{10}$  Дж и  $\alpha_a = 5.7\%$ . Сравнение значений  $\alpha_a$  для российской и германской станций позволяет отбросить значение  $\alpha_a = 2.5\%$  как заниженное.

Таким образом, в энергию инфразвукового излучения вблизи места взрыва метеороида преобразовалось около  $11.4 \pm 3\%$  кинетической энергии космического тела, а на расстояниях 320, 592, 1053 и 1417 км доля этой энергии составляла около 11, 5, 6, и 5.7% соответственно. Похоже на то, что при  $R = 500 \dots 1500$  км значение  $\alpha_a$  было примерно одним и тем же и составляло 5...6%. Некоторое уменьшение  $\alpha_a$  при увеличении  $R$ , очевидно, связано с потерями акустической энергии при распространении инфразвука.

Добавим, что значение  $\alpha_a$  для тел метрового диапазона в настоящее время является весьма неопределенным [13, 15, 18, 30—32]. Эта неопределенность, скорее всего, связана со сложностью траекторий инфразвуковой волны, ее ослаблением при отражениях, что и определяет зависимость  $\alpha_a$  от расстояния. Из-за этого и могла возникать упомянутая неопределенность отношения акустической энергии к начальной кинетической энергии метеороида.

**Таблица 5. Параметры акустического сигнала**

Станция	Диапазон скоростей прихода, м/с		$v$ , м/с
МААГ2	243...289	96.2°	-2.2
ВАЛАМ	263...313	47°	+13.6
МААГ1	269...293	71.9°	+6.2
I26DE	250...269	165.6°	-19.4
I43RU	293	55.5°	+11.3

**Скорость прихода сигнала. Скорость ветра.** Из табл. 5 видно, что скорость  $v$  прихода акустического сигнала для каждой станции изменялась в достаточно широких пределах (до  $\pm 18\%$ ). Скорость также заметно отличалась для различных станций, что обусловлено, прежде всего, влиянием тропосферно-стратосферного ветра. Скорость прихода акустического сигнала связана со скоростью ветра  $w$  следующим образом:

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

где  $v_0$  — добавка к истинной скорости за счет влияния ветра,  $v$  — истинная скорость прихода акустического сигнала,  $A_w$  — азимуты направления ветра и точки взрыва метеороида для каждой из станций.

В зимнее время тропосферно-стратосферный ветер направлен примерно с запада на восток, т. е.  $A_w \approx 270^\circ$ . Это означает, что для западных станций (по отношению к точке взрыва)  $A_w > 90^\circ$  и  $v < 0$ , а для восточных  $A_w < 90^\circ$  и  $v > 0$  (см. табл. 5). Зная  $v$  и  $A_w$  для двух станций, можно оценить истинную скорость акустического сигнала и скорость ветра. Имея набор  $v$  и  $A_w$  для большего количества станций и применяя метод наименьших квадратов, можно повысить точность определения  $v_0$  и  $w$ , которые предполагаются одинаковыми для различных трасс. Именно так и поступили авторы. Оказалось, что  $v_0 \approx 280$  м/с, а  $w \approx 20$  м/с.

Примерно такие же значения скорости ветра дают и метеорологические наблюдения (см., например, международные модели атмосферы). Естественно, что такая оценка даст лишь среднее значение для стратосферных высот (10...40 км).

**Средняя скорость инфразвука на тропосферно-стратосферных высотах.** Как известно, скорость звука в атмосфере определяется прежде всего высотным профилем температуры воздуха  $T_a(z)$ . Этот профиль — немонотонный. В отсутствие температурной инверсии  $T_a$  сначала уменьшается до высоты примерно 10 км с градиентом около  $-6$  К/км в зимнее время, затем в диапазоне высот 10...23 км температура составляет  $T_a \approx 210$  К. Далее  $T_a$  увеличивается от 210 К на высоте 23 км до 260 К на высоте около 46 км.

Численное интегрирование с использованием модельного профиля  $T_a(z)$  позволило определить время запаздывания инфразвукового сигнала на трассе область взрыва метеороида — станция IPLOR ( $R \approx 53$  км).

Из-за малой длины трассы она была практически прямолинейной. По нашим оценкам ее длина в стратосфере составляла около 35—37 км, а в тропосфере — 18...16 км. Для более протяженных трасс стратосферная часть траектории в 3-4 раза больше тропосферной. Время запаздывания оказалось равным 166 с. Измеренное значение этого времени близко к 167 с. Расчетное значение скорости прихода для этой станции  $v \approx 319$  м/с, а полученное из наблюдений — 317 м/с. Последняя скорость практически совпала со средней по высоте скоростью инфразвуковой волны.

## ВЫВОДЫ

Анализ временных зависимостей флуктуаций уровня давления, зарегистрированных на шести инфразвуковых станциях, удаленных от места взрыва Румынского метеороида на расстояния от 53 до 1423 км, показал следующее.

1. Инфразвуковой сигнал с разной степенью достоверности регистрировался на всех шести станциях. Наибольшая амплитуда сигнала величиной около 50 Па отмечалась на расстоянии около 53 км от места взрыва. При расстояниях 313, 332, 583, 1034 и 1423 км она достигала значений 3...4, 3...4, 0.5...1, 1...1.5 и 0.5...0.6 Па соответственно.

2. Период инфразвуковых колебаний изменялся в пределах 1...10 с со средним значением около 3.7 с.

3. Судя по траекторным данным, метеороид был каменного класса. Его первоначальная масса была близка к 2.6 т, объем — к 0.7...0.8 м<sup>3</sup>, диаметр — к 1.1 м.

4. Энергия акустического сигнала изменялась от 160...240 ГДж в ближней зоне до 180...100 ГДж на удалениях в 0.3...1.5 тыс. километров соответственно. Отношение энергии акустических волн начальной кинетической энергии при этом уменьшалось от 8...14 до 5...6 %.

5. Разнесенный прием акустического сигнала позволил оценить истинную (скорректированную) скорость прихода сигнала (около 280 м/с) и среднюю скорость тропосферно-стратосферного ветра (около 20 м/с).

Авторы выражают свою благодарность коллективу Национального центра данных Украины за предоставление первичных данных наблюдений.

1. *Катастрофические воздействия космических тел* / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчикова. — М.: ИХЦ «Академкнига», 2005.—310 с.
2. *Кручиненко В. Г.* Математико-фізичний аналіз метеороного явища. — К.: Наук. думка, 2012.—294 с.
3. *Лящук О. І., Андрущенко Ю. А., Гордієнко Ю. О. та ін.* Можливість використання даних інфразвукового моніторингу під час ідентифікації природи сейсмічних подій // Геофізический журн.—2015.—**37**, № 6.—С. 105—114.
4. *Черногор Л. Ф.* Физика и экология катастроф: Монография. — Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012.—556 с.
5. *Черногор Л. Ф.* Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // Инженерная физика.—2013.—№ 8.—С. 23—40.
6. *Arrowsmith S. J., Drob D. P., Hedlin M. A. H., Edwards W.* A joint seismic and acoustic study of the Washington State bolide: Observation and modeling // J. Geophys. Res.—2007.—**112**.—D09304, doi: 10.1029JD008001.
7. *Borovička J., Kalenda P., Jopek T., et al.* The Morávka meteorite fall: 4. Meteoroid dynamics and fragmentation in the atmosphere // Meteoritics and Planet. Sci.—2003.—**38**, N 7.—P. 1023—1043.
8. *Borovička J., Spurný P., Kalenda P., Tagliaferri E.* The Morávka meteorite fall: 1. Description of the events and determination of the fireball trajectory and orbit from video records // Meteoritics and Planet. Sci.—2003.—**38**, N 7.—P. 975—987.

9. *Borovička J., Weber H. W., Jopek T., et al.* The Morávka meteorite fall: 3. Meteoroid initial size, history, structure, and composition // *Meteoritics and Planet. Sci.*—2003.—**38**, N 7.—P. 1005—1021.
10. *Brown P., Hildebrand A. R., Green W. E., et al.* The fall of the St-Robert meteorite // *Meteoritics and Planet. Sci.*—1999.—**31**.—P. 502—517.
11. *Brown P. G., Kalenda P., ReVelle D. O., Borovička J.* The Morávka meteorite fall: 2. Interpretation of infrasonic and seismic data // *Meteoritics and Planet. Sci.*—2003.—**38**, N 7.—P. 989—1003.
12. *Brown P., Pack D., Edwards W. N., et al.* The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite // *Meteoritics and Planet. Sci.*—2004.—**39**, N 11.—P. 1781—1796.
13. *Brown P. G., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Hildebrand A. R.* An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records // *Meteoritics and Planet. Sci.*—2002.—**37**.—P. 661—675.
14. *Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E.* The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // *Nature*.—2002.—**420**.—P. 294—296.
15. *Brown P. G., Whitaker A. W., ReVelle D. O.* Multi-station infrasonic observations of two large bolides: signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions // *Geophys. Res. Lett.*—2002.—**29**, N 13.—1636, 10.1029/2001GL013778.
16. *Cevolani G., Foschini L., Trivellone G.* The «Lugo» fireball of January 19, 1993 // *Il Nuovo Cimento*.—1993.—**16**, N 4.—P. 463—471.
17. *Cevolani G., Hajdukova M., Foschini L., Trivellone G.* The spectacular airburst over Lugo (Italy) on January 19, 1993 // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*.—1994.—**24**.—P. 117—124.
18. *Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N., Silber E. A.* Infrasound production by bolides: A global statistical study // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*—2012.—**80**.—P. 208—229.
19. *Foschini L.* On the airburst of large meteoroids in the Earth's atmosphere. The Lugo bolide: reanalysis of a case study // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**L5**.—P. 337.
20. *Ghica D., Ionescu C., Popa M.* Seismoacoustic monitoring of local events // *CTBT: Science and Technology conference. Book of abstracts*.—2015.—P. 99
21. *Hildebrand A. R., Brown P. G., Wacker J. F., et al.* The St-Robert bolide of June 14, 1994 // *J. Roy. Astron. Soc. Canada*.—1997.—**91**.—P. 261—275.
22. *Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A.* *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. — Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010.—734 p.
23. *Le Pichon A., Guérin J. M., Blanc E.* Trail in the atmosphere of the 29 December 2000 meteor as recorded in Tahiti: Characteristics and trajectory reconstitution // *J. Geophys. Res.*—2002.—**107**, N D23, 4709.—doi: 10.1029/2001JD001283.
24. *Llorka J., Trigo-Rodríguez J. M., Ortiz J. L., et al.* The Villalbeto de la Peña meteorite fall: 1. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field, and petrography // *Meteoritics and Planet. Sci.*—2005.—**40**, N 6.—P. 795—804.
25. *McCord T. B., Morris J., Persing D., et al.* Detection of a meteoroid entry into the Earth's atmosphere on February 1, 1994 // *J. Geophys. Res.*—1995.—**100**, N E2.—P. 3245—4709.
26. *Passey Q. R., Melosh H. J.* Effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus*.—1980.—**42**, N 2.—P. 211—233.
27. *Popova O., Borovička J., Hartmann K., et al.* Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids // *Meteoritics and Planet. Sci.*—2011.—**46**, N 10.—P. 1525—1550.
28. *Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., et al.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*.—2013.—**342**.—P. 1069—1073.

29. *Pricopi D., Dascalu M., Badescu O., et al.* Orbit reconstruction for the meteoroid of the meteorite-producing fireball that exploded over Romania on January 7, 2015 // *Proc. Romanian Academy, Ser. A.*—2016.—**17**, N 2.—P. 133—136.
30. *ReVelle D. O.* Recent advances in bolide entry modeling: a bolide potpourri // *Earth, Moon, and Planets.*—2004.—**95**, N 1—4.—P. 441—476.
31. *ReVelle D. O., Whitaker R. W.* Analysis of the acoustic conversion efficiency for infrasound from atmospheric entry of NEOs // *Comet Day II.* — Albuquerque, 1996.—P. 12.
32. *ReVelle D. O., Whitaker R. W.* Acoustic efficiency analysis using infrasound from NEOs // *Proc. of the 5th Internat. Conf. of Space 96 / Ed. S. W. Johnson.* — Albuquerque, New Mexico, 1997.—P. 10—17.
33. *Tagliaferri E., Spalding R., Jacobs C., Ceplecha Z.* Analysis of the Marshall Islands Fireball of February 1, 1994 // *Earth, Moon, and Planet.*—1995.—**68**.—P. 563—572.
34. *Trigo-Rodriguez J. M., Borovička J., Spurný P., et al.* The Villalbeto de la Peca meteorite fall: II. Determination of atmospheric trajectory and orbit // *Meteorites and Planet. Sci.*—2006.—**41**, N 4.—P. 505—517.

Статья поступила в редакцию 10.09.16