

## РАДІОФІЗИКА ГЕОКОСМОСУ

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.01.024>

УДК 551.558, 551.596,  
534.221

PACS numbers: 93, 96.30.Ys

Л. Ф. ЧЕРНОГОР, Н. Б. ШЕВЕЛЕВ

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА, СГЕНЕРИРОВАННОГО ЧЕЛЯБИНСКИМ КОСМИЧЕСКИМ ТЕЛОМ: ГЛОБАЛЬНАЯ СТАТИСТИКА

*Предмет и цель работы: Предмет исследования – статистические характеристики инфразвукового сигнала (время запаздывания; скорость прихода и ее зависимость от расстояния между источником и местом регистрации, а также от азимута; длительность; период и амплитуда), сгенерированного при пролете и взрыве Челябинского космического тела 15 февраля 2013 г.*

*Целью работы является построение корреляционных полей “скорость прихода сигнала – расстояние”, “скорость прихода сигнала – синус азимута”, “длительность сигнала – расстояние”, “амплитуда сигнала – расстояние” и “период – период” для периодов, оцененных по двум методикам, а также их аппроксимация простыми аналитическими соотношениями. Термин “расстояние” здесь относится к расстоянию между источником инфразвука и регистрирующей его станцией.*

*Методы и методология: С использованием базы данных инфразвуковой системы мониторинга (IMS) ядерных испытаний, принадлежащей Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СВТО), получены аппроксимирующие зависимости для основных характеристик инфразвукового сигнала, сгенерированного при пролете и взрыве Челябинского космического тела 15 февраля 2013 г.*

*Результаты: Показано, что корреляционное поле “скорость прихода инфразвукового сигнала – расстояние между источником и станцией” обладает значительным разбросом, среднее значение скорости составляет  $(286.0 \pm 21.5)$  м/с. Получены аппроксимирующие зависимости для скорости прихода инфразвукового сигнала от расстояния между источником и станцией, а также от азимута источника, для длительности и амплитуды сигнала от расстояния. Построено корреляционное поле для периодов основного колебания, оцененного по двум различным методикам.*

*Заключение: Время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось практически по линейному закону при увеличении расстояния между источником инфразвука и станцией. Средняя по всем трассам скорость прихода инфразвукового сигнала составляла 291 м/с. Зависимость скорости прихода от расстояния из-за сильного разброса данных наблюдений аппроксимирована константой. Зависимость скорости прихода от синуса азимутального угла (рассчитанного и оцененного) аппроксимирована линейным законом, из которого оценены средние по всем трассам значения скорости  $(287 \div 288)$  м/с и скорости тропосферно-стратосферного ветра  $(12 \div 14)$  м/с. Зависимость длительности инфразвукового сигнала от расстояния аппроксимирована линейным законом. При этом длительность сигнала вблизи источника составляла около 10.7 мин. В спектре инфразвукового сигнала на разных станциях преобладали составляющие с периодом примерно от 17 до 85 с. Средние значения периодов, полученные по различным методикам, изменялись примерно от 35 до 39 с.*

*Ключевые слова: Челябинский метеороид, время запаздывания сигнала, скорость прихода, длительность сигнала, амплитуда сигнала, период сигнала, аппроксимирующие зависимости*

#### 1. Введение

Челябинский метеороид вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03:20:22 (здесь и далее всемирное время UT). Пролет и взрыв космического тела сопровождался целым комплексом физических процессов [1–14]. Важное место среди них занимает генерация и распространение инф-

развукового сигнала. Результаты регистрации этого сигнала изложены в ряде работ [6–9, 15–23].

В статье [20] описаны акустические эффекты Челябинского метеороида, изученные по регистрациям сигнала на 9 инфразвуковых станциях, расположенных в Восточной Европе, Сибири и на Камчатке.

В работах [21, 22] проведен системный спектральный анализ инфразвуковых сигналов, зарегистрированных на германской станции в Антарктиде.

Представляет интерес более детальное изучение глобальных особенностей инфразвуковых сигналов, зарегистрированных 15 станциями международной системы мониторинга (IMS) ядерных испытаний Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СВТО) [24].

Целью настоящей работы является построение корреляционных полей “скорость прихода сигнала – расстояние”, “скорость прихода сигнала – синус азимута”, “длительность сигнала – расстояние”, “амплитуда сигнала – расстояние” и “период – период” для периодов, оцененных по двум методикам, а также их аппроксимация простыми аналитическими соотношениями. Термин “расстояние” здесь относится к расстоянию между источником инфразвука и регистрирующей его станцией.

## 2. Общие сведения

Основные сведения об инфразвуковых станциях СВТО, зарегистрировавших акустический сигнал от Челябинского метеороида, приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что из 15 станций только 2 расположены в Южном полушарии (I33MG, Мадагаскар и I27DE, Антарктида). Расстояние  $r$  от источника инфразвука до регистрирующей станции изменялось от 530 км (стан-

ция I31KZ) до 14983 км (станция I27DE). Наблюдаемый азимут источника инфразвука изменялся от 2 до 355°, а теоретически рассчитанный – от 1 до 341°.

Основные сведения о параметрах инфразвукового сигнала приведены в табл. 2, из которой видно, что при увеличении  $r$  время запаздывания сигнала  $\Delta t$  изменялось примерно от 28 до 870 мин, его длительность  $\Delta T$  – от 377 до 2142 с, амплитуда  $\Delta p$  – от 0.195 до 6.31 Па, период колебаний, определенный по максимальной амплитуде в цуге,  $T_{amp}$  – от 19.28 до 84.7 с, а период, определенный по положению максимума в спектральной плотности мощности,  $T_{PSD}$  – от 16.72 до 81.92 с. Как следует из табл. 2, увеличение  $r$  не обязательно сопровождалось увеличением  $\Delta t$ ,  $\Delta T$ ,  $T_{amp}$ ,  $T_{PSD}$  и уменьшением  $\Delta p$ .

## 3. Результаты анализа данных наблюдений. Корреляционные поля и аппроксимирующие зависимости

Зависимость времени запаздывания сигнала от расстояния показана на рис. 1, из которого можно видеть, что с увеличением  $r$  время запаздывания увеличивается практически по линейному закону. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\Delta t = 57.266r + 6.324. \quad (1)$$

Таблица 1. Основные сведения об инфразвуковых станциях

Расстояние до станции, км	Станция	Широта	Долгота	Теор. азимут, °	Наблюдаемый азимут, °
530	I31KZ	50.4°N	58.03°E	22	29
1502	I43RU	56.7°N	37.3°E	88	97
1532	I46RU	53.95°N	84.82°E	283	268
3185	I34MN	47.80°N	106.41°E	301	230
3257	I26DE	48.85°N	13.71°E	60	56
4893	I18DK	77.47°N	69.29°W	39	17
5022	I45RU	43.7°N	131.9°E	310	305
5798	I44RU	51.1°N	158.8°E	314	302
6481	I53US	64.8°N	146.9°W	341	339
8147	I10CA	50.2°N	96.0°W	14	355
8311	I33MG	18.8°S	47.5°E	8	12
8554	I56US	48.3°N	117.1°W	1	352
10182	I57US	34.07°N	120.58°W	1	2
11030	I59US	19.59°N	155.89°W	339	316
14983	I27DE	70.68°S	8.27°W	49	61

Таблица 2. Основные сведения о параметрах инфразвукового сигнала

Станция	Время прихода UT	Время запаздывания, мин	Скорость прихода сигнала, м/с	Длительность сигнала, с	Амплитуда сигнала, Па	Период $T_{amp}$ , с	Период $T_{PSD}$ , с
I31KZ	03:48:08	27.77	318.13	1026	6.12	37.99	45.51
I43RU	05:02:09	101.78	245.95	2142	0.79	38.48	30.06
I46RU	04:44:29	84.13	303.49	701	1.26	21.08	16.72
I34MN	06:14:55	174.55	304.12	924	0.25	22.79	30.34
I26DE	07:10:31	230.15	235.86	812	0.485	28.98	29.26
I18DK	08:17:13	296.85	274.72	1948	1.365	49.99	69.72
I45RU	07:55:27	275.08	304.27	887	0.67	38.45	21.01
I44RU	08:50:55	330.55	292.34	1471	0.45	19.28	60.68
I53US	09:36:30	376.13	287.18	1660	6.31	25.69	19.74
I10CA	11:29:57	489.58	277.34	1107	1.375	32.53	36.41
I33MG	11:20:35	480.22	288.45	720	0.97	47.96	43.12
I56US	11:35:08	494.77	288.15	1621	0.795	29.45	30.91
I57US	13:10:00	589.63	287.81	2000	0.795	28.45	27.31
I59US	13:42:44	622.37	295.38	377	0.195	84.7	81.92
I27DE	17:50:43	870.35	286.92	830	0.93	45.15	44.28

При этом коэффициент достоверности  $R \approx 0.998$ , а стандартное отклонение  $\sigma \approx 15.06$ . Здесь  $r$  измеряется в мегаметрах, а  $\Delta t$  – в минутах.

Зависимость скорости прихода сигнала от расстояния приведена на рис. 2. Из рисунка видно, что имеет место значительный разброс данных, при этом скорость прихода сигнала  $v$  изменяется от 235 до 318 м/с. Среднее значение

скорости составляет  $\bar{v} = 286$  м/с, а стандартное отклонение – 21.5 м/с.

Зависимость скорости прихода инфразвуковой волны от синуса теоретически рассчитанного азимута  $A_{th}$  источника сигнала показана на рис. 3, а, б из которого видно, что, несмотря на значительный разброс точек, зависимость может быть аппроксимирована уравнением линейной рег-

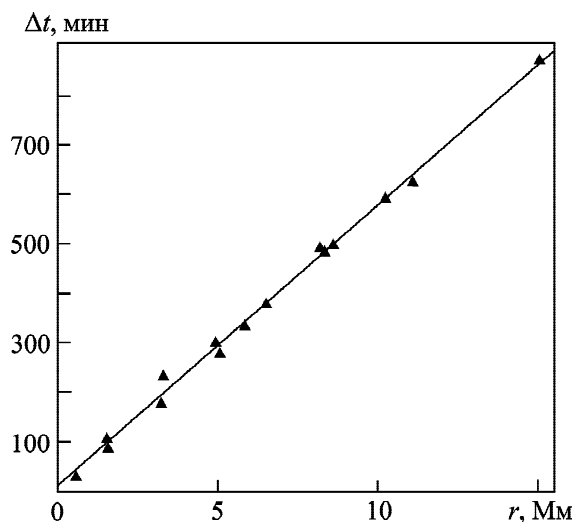


Рис. 1. Зависимость времени запаздывания прихода акустического сигнала от расстояния: аппроксимация данных регистрации на 15 станциях линейным законом  $\Delta t = 57.266r + 6.324$  ( $R \approx 0.998$ ,  $\sigma \approx 15.06$ )

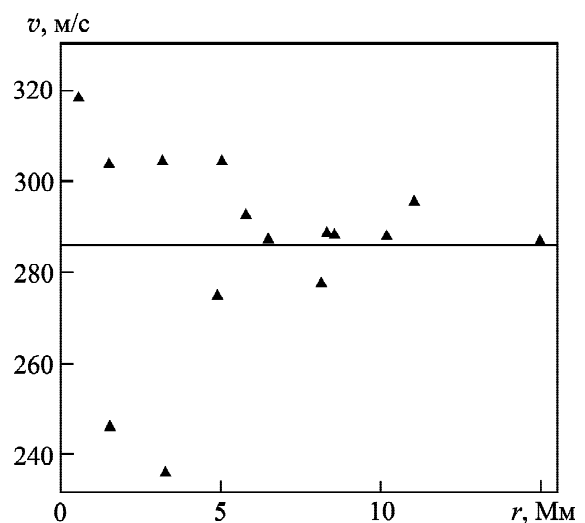
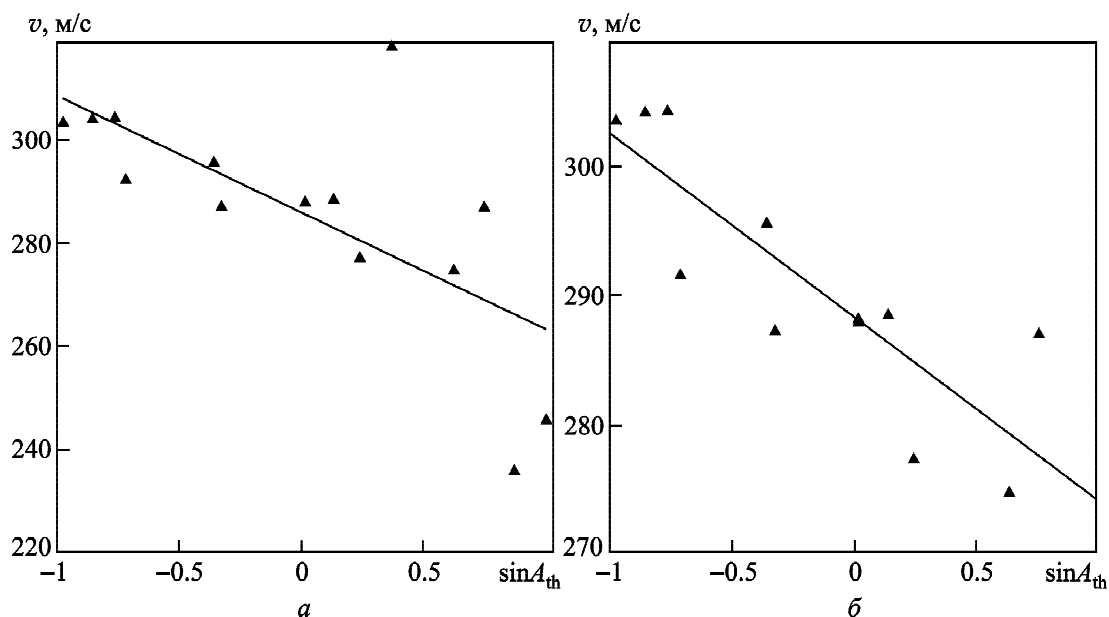


Рис. 2. Зависимость скорости прихода инфразвуковой волны от расстояния: аппроксимация данных 15 станций линейным законом  $\bar{v} = 286$  м/с ( $\sigma \approx 21.5$  м/с)



**Рис. 3.** Зависимость скорости прихода инфразвуковой волны от синуса теоретически рассчитанного азимута прихода: *a* – аппроксимация данных 15 станций линейным законом  $v = -22.562 \sin A_{th} + 286.065$  ( $R \approx 0.685$ ,  $\sigma \approx 16.25$ ); *б* – аппроксимация данных 12 станций (с исключением из рассмотрения данных станций I31KZ, I43RU и I26DE – точки (0.3746, 318.1), (0.9994, 245.9) и (0.866, 235.9)) линейным законом  $v = -14.276 \sin A_{th} + 288.23$  ( $R \approx 0.85$ ,  $\sigma \approx 5.35$ ). Точки (0.01, 288.14) и (0.01, 287.8) практически совпадают

рессии. При включении в рассмотрение данных всех станций это уравнение имеет вид:

$$v = -22.562 \sin A_{th} + 286.065, \quad (2)$$

$$R \approx 0.685, \quad \sigma \approx 16.25.$$

Здесь и далее коэффициенты при аргументе и свободный член даются в метрах в секунду.

Если же исключить из рассмотрения наиболее удаленные от линии регрессии точки, соответствующие данным станций I31KZ, I43RU и I26DE, то получим следующее уравнение:

$$v = -14.276 \sin A_{th} + 288.23, \quad (3)$$

$$R \approx 0.85, \quad \sigma \approx 5.35.$$

Аналогичные зависимости  $r$  от синуса наблюдаемого азимута  $A_{obs}$  при учете данных всех станций и при исключении данных станций I31KZ, I43RU и I26DE имеют вид (рис. 4, *a*, *б*):

$$v = -19.818 \sin A_{obs} + 284.69, \quad (4)$$

$$R \approx 0.621, \quad \sigma \approx 17.48;$$

$$v = -12.251 \sin A_{obs} + 287.47, \quad (5)$$

$$R \approx 0.723, \quad \sigma \approx 7.015.$$

Зависимость длительности сигнала от расстояния показана на рис. 5. Из рис. 5, *a* видно, что при учете данных измерений на всех 15 станциях имеется значительный разброс точек, а линейная регрессия описывается убывающей функцией:

$$\Delta T = -17.49r + 1324, \quad (6)$$

$$R \approx 0.129, \quad \sigma \approx 563.9.$$

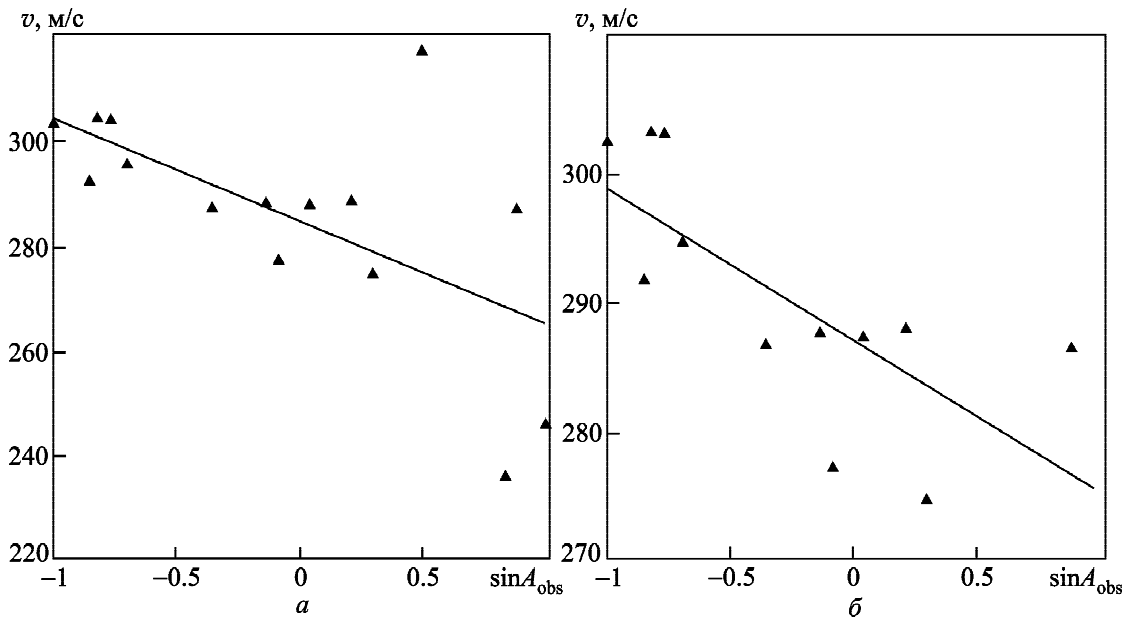
После исключения наиболее удаленных точек, соответствующих данным станций I43RU, I18DK, I33MG, I27DE и I59US, приходим к следующему уравнению регрессии (рис. 5, *б*):

$$\Delta T = 109.9r + 642.1, \quad (7)$$

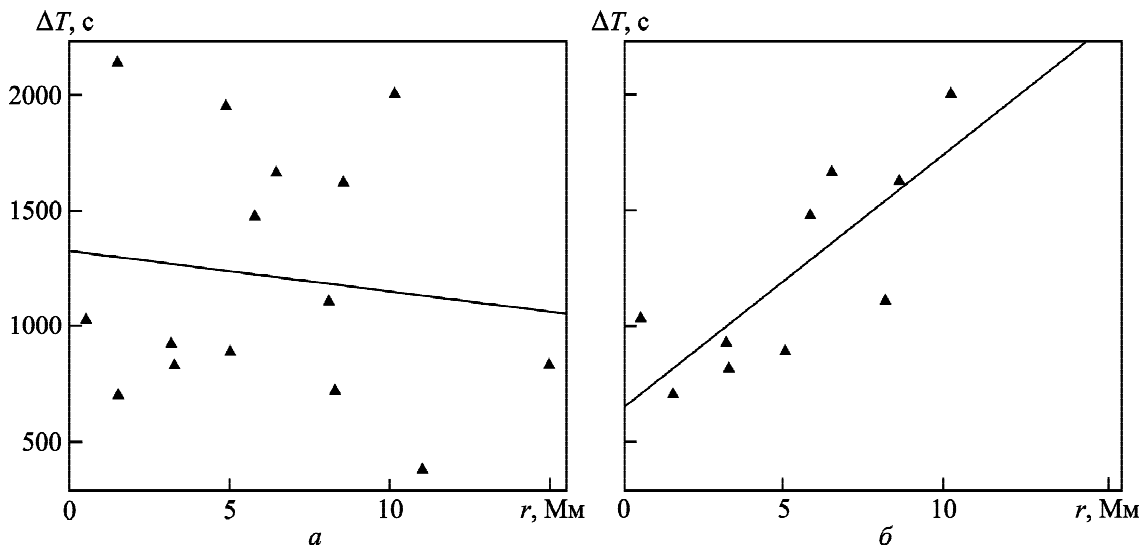
$$R \approx 0.796, \quad \sigma \approx 279.8.$$

Здесь  $r$  дается в мегаметрах, а  $\Delta T$  – в секундах.

Корреляционное поле “ $T_{PSD} - T_{amp}$ ” и линия регрессии показаны на рис. 6. Заметим, что периоды  $T_{PSD}$  и  $T_{amp}$  оцениваются по методикам СТВО по положению максимума в спектральной плотности мощности и по максимальной амплитуде колебания в цуге соответственно. Из рис. 6, *a*, *б* можно видеть, что обе методики



**Рис. 4.** Зависимость скорости прихода инфразвуковой волны от синуса наблюдаемого азимута прихода: *a* – аппроксимация данных 15 станций линейным законом  $v = -19.818 \sin A_{\text{obs}} + 284.69$  ( $R \approx 0.621$ ,  $\sigma \approx 17.48$ ); *б* – аппроксимация данных 12 станций (с исключением из рассмотрения данных станций I31KZ, I43RU и I26DE) линейным законом  $v = -12.251 \sin A_{\text{obs}} + 287.47$  ( $R \approx 0.723$ ,  $\sigma \approx 7.015$ )



**Рис. 5.** Зависимость длительности акустического сигнала от расстояния: *a* – аппроксимация данных 15 станций линейным законом  $\Delta T = -17.49r + 1324$  ( $R \approx 0.129$ ,  $\sigma \approx 563.9$ ); *б* – аппроксимация данных 10 станций (с исключением из рассмотрения данных станций I43RU, I18DK, I33MG, I27DE, I59US) линейным законом  $\Delta T = 109.9r + 642.1$  ( $R \approx 0.796$ ,  $\sigma \approx 279.8$ )

для ряда станций дают близкий результат при значениях периодов от 20 до 40 с. При использовании данных всех 15 станций уравнение регрессии имеет вид:

$$T_{\text{amp}} = 0.6138T_{\text{PSD}} + 12.71, \quad (8)$$

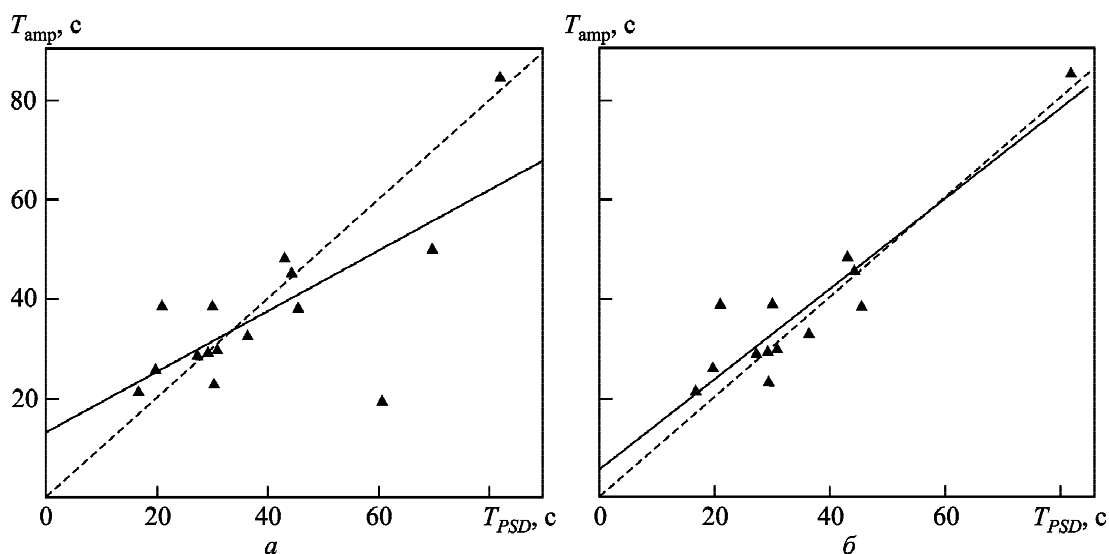
$$R \approx 0.709, \quad \sigma \approx 11.98.$$

Здесь и далее периоды даются в секундах.

Если же исключить из рассмотрения данные станции I44RU и I18DK, то уравнение регрессии примет вид:

$$T_{\text{amp}} = 0.902T_{\text{PSD}} + 5.376, \quad (9)$$

$$R \approx 0.918, \quad \sigma \approx 6.825.$$

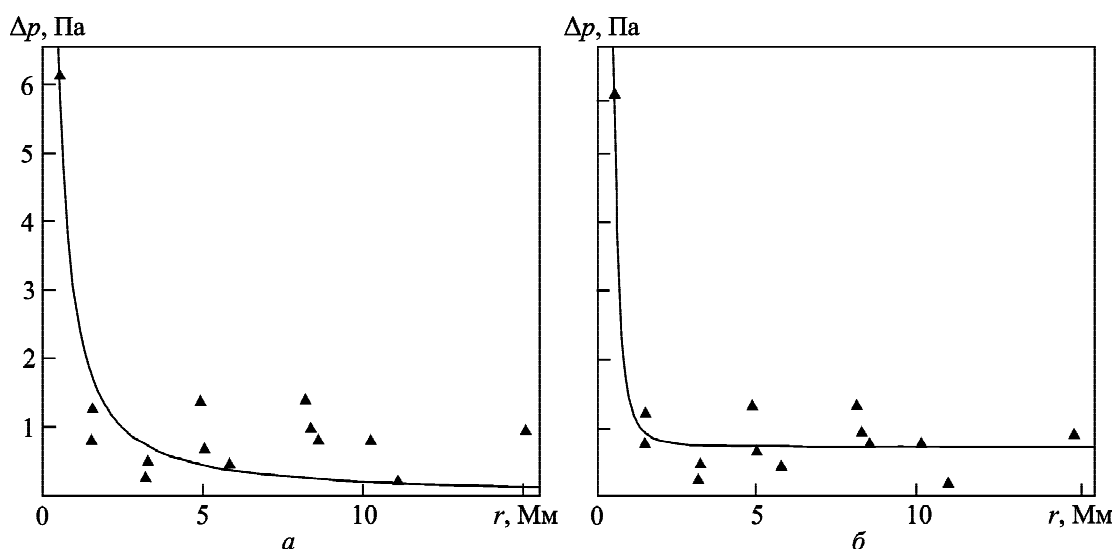


**Рис. 6.** Зависимость периода  $T_{amp}$ , полученного по методике, основанной на определении периода по максимальной амплитуде, от периода  $T_{PSD}$ , полученного по методике, основанной на определении периода по максимуму спектральной плотности мощности: *а* – аппроксимация данных 15 станций линейным законом  $T_{amp} = 0.6138T_{PSD} + 12.71$  ( $R \approx 0.709$ ,  $\sigma \approx 11.98$ ); *б* – аппроксимация данных 13 станций (с исключением из рассмотрения данных станций I44RU и I18DK) линейным законом  $T_{amp} = 0.902T_{PSD} + 5.376$  ( $R \approx 0.918$ ,  $\sigma \approx 6.825$ ). Штриховой линией показана ожидаемая зависимость

Средние значения по данным 15 и 13 станций составляли  $\overline{T_{amp}} = 36.73$  с и  $\overline{T_{amp}} = 37.05$  с, а также  $\overline{T_{PSD}} = 39.13$  с и  $\overline{T_{PSD}} = 35.12$  с соответственно.

*Зависимость амплитуды сигнала от расстояния.* Приведем зависимость амплитуды давления в инфразвуковой волне от расстояния

(рис. 7). Из рисунка можно видеть, что имеет место значительный разброс точек. Из рассмотрения исключены данные инфразвуковой станции США I53US с аномально высокой амплитудой ( $\Delta p \approx 6.31$  Па при  $r = 6481$  км). Регрессионные зависимости имеют вид:



**Рис. 7.** Зависимость амплитуды давления в инфразвуковой волне от расстояния: *а* – аппроксимация данных 14 станций законом  $\Delta p = 2.803r^{-1.157}$  ( $R \approx 0.896$ ,  $\sigma \approx 0.679$ ); *б* – аппроксимация данных 14 станций законом  $\Delta p = 0.75r^{-3.099} + 0.758$  ( $R \approx 0.969$ ,  $\sigma \approx 0.397$ ). Из рассмотрения исключены данные станции I53US – точка (6.481, 6.31)

$$\Delta p = 2.803r^{-1.157}, \quad (10)$$

$$R \approx 0.896, \quad \sigma \approx 0.679;$$

$$\Delta p = 0.75r^{-3.099} + 0.758, \quad (11)$$

$$R \approx 0.969, \quad \sigma \approx 0.397;$$

где  $r$  измеряется в мегаметрах, а  $\Delta p$  – в паскалях.

#### 4. Обсуждение

Рассмотрим зависимость времени запаздывания инфразвукового сигнала от расстояния (см. рис. 1). Экспериментальные точки достаточно хорошо группируются вокруг линии регрессии (1). Наклон прямой характеризует среднюю по всем трассам скорость прихода сигнала

$$\bar{v} = \left( \frac{d\Delta t}{dr} \right)^{-1} = \frac{1}{56.9} \frac{\text{км}}{\text{мин}} \approx 291 \text{ м/с}. \quad (12)$$

При расстоянии  $r=0$  имеем время запаздывания  $\Delta t_0 \approx 6.324$  мин, которое должно описывать время распространения сигнала от места генерации до поверхности Земли. Такое значение представляется сильно завышенным. По данным работы [20],  $\Delta t_0 \approx (1.3 \pm 0.1)$  мин. Различие в значениях  $\Delta t_0$  обусловлено большим значением  $\sigma$  при аппроксимации выражением (1).

Значительный разброс точек на рис. 2 является следствием существенных различий физических условий на трассах распространения инфразвука, длина которых изменялась от 530 до 14983 км. Трассы проходили через Северное и Южное полушария, одни трассы были восточнее источника инфразвука, другие – западнее. Значительный вклад в вариации скорости прихода дает направление и сила ветра на высотах тропосферы, стратосферы и термосферы. По данным рис. 2 среднее по всем трассам значение скорости  $v_{av}$  составляло 286 м/с. Оценки по соотношению (12) дали близкий результат: 291 м/с.

Разброс скоростей на рис. 2 частично объясняет рис. 3, где приведена зависимость  $v$  от  $\sin A_{th}$ , а также регрессии (2) и (3). Свободный член в уравнениях (2) и (3) составляет  $\approx 286$  и  $\approx 288$  м/с. Эта скорость близка как к  $v_{av} \approx 286$  м/с, так и к  $\bar{v} \approx 291$  м/с. Коэффициент при синусе характеризует среднюю скорость

ветра  $w$  на всех трассах. Как следует из (2) и (3), значения  $w$  в зависимости от способа аппроксимации составляют около 23 и 14 м/с. Для сравнения укажем, что для ближайших станций, ряд из которых расположен на 1500 км западнее, а ряд – на 1500 км восточнее источника инфразвука, получена оценка  $w \approx 30$  м/с [20]. Последняя оценка хорошо подтверждалась результатами метеонаблюдений. Подчеркнем, что в Северном полушарии в феврале 2013 г. направление ветра было ориентировано с запада на восток.

При использовании регрессионных зависимостей (4) и (5) имеем близкие результаты:  $\bar{v} \approx 285 \div 287$  м/с, а  $w \approx 12 \div 20$  м/с (см. рис. 4).

Обсудим зависимость длительности инфразвукового сигнала от расстояния между источником инфразвука и станцией (см. рис. 5). Увеличение длительности сигнала при увеличении расстояния обусловлено многочисленными переотражениями волны в волноводах “Земля – стратосфера” и “Земля – термосфера”, многомодовостью сигнала, дисперсионным расплыванием волнового пакета в волноводе. Уменьшение длительности может быть обусловлено как различной пропускной способностью упомянутых волноводов, так и различным ослаблением спектральных составляющих инфразвукового пакета. Как показано в работах [21–23], в спектре инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом, присутствовали составляющие с  $T \approx 10 \div 100$  с. Для такого сверхширокополосного сигнала дисперсия выражена достаточно сильно. Именно дисперсией объяснялось уширение инфразвукового сигнала в работе [20].

Аппроксимация (6), описываемая убывающей функцией, представляется нефизичной. После исключения сильно удаленных точек получена аппроксимация (7). При этом длительность сигнала увеличивается с увеличением расстояния. При  $r=0$  значения  $\Delta T_0 \approx 642$  с  $\approx 10.7$  мин. Для сравнения укажем, что в работе [20] получено, что  $\Delta T_0 \approx (4.75 \pm 0.15)$  мин. Если  $\Delta T_0 \approx 10.7$  мин, то вклад в излучение инфразвука дает след метеороида длиной около 210 км, или диапазон высот около 70 км, т. е. примерно от 90 до 20 км.

Из рис. 6 следует, что значения периодов, определяемых по двум независимым методикам, могут существенно различаться. В то же время к точности оценки периодов предъявляются повышенные требования, так как по значению  $T$

оценивается начальная кинетическая энергия космического тела [15, 25, 26]. После исключения из данных измерений на станциях I44RU и I18DK коэффициент достоверности  $R$  заметно увеличился от 0.709 до 0.918 (см. соотношения (8) и (9)). Существенно уменьшилось и стандартное отклонение  $\sigma$  – от  $\approx 12$  до  $\approx 6.8$  с.

Обсудим зависимость амплитуды сигнала от расстояния  $\Delta p(r)$ . На станции I53US зарегистрировано аномально большое значение амплитуды. Это может быть связано с фокусировкой акустических лучей на трассе распространения. В любом случае это значение исключалось из дальнейшего анализа. Регрессия, даваемая соотношением (11), несмотря на высокое значение коэффициента достоверности (0.969), не имеет физического объяснения. Во-первых, отмечается слишком быстрое убывание  $\Delta p$  при увеличении  $r$ . Даже при сферической расходимости волны  $\Delta p \sim r^{-1}$ , а при цилиндрической расходимости в волноводе “Земля – стратосфера” (или “Земля – термосфера”)  $\Delta p \sim r^{-0.5}$ . Во-вторых, при  $r \rightarrow \infty$  имеем  $\Delta p \approx 0.758$  Па. Поэтому предпочтение отдано аппроксимации (10). Эта аппроксимация близка к зависимости  $\Delta p \sim r^{-1.2}$  [26]. В этом случае убывание  $\Delta p$  при увеличении  $r$  происходит несколько быстрее, чем за счет сферической расходимости. Это может быть объяснено дополнительным ослаблением волны при ее распространении. Кроме того,  $\Delta p(\infty) = 0$ , как это и должно быть. В то же время аппроксимация (10) занижает значения амплитуды при  $r \geq 3$  Мм. Требуется поиск более точных регрессий  $\Delta p(r)$ , чем регрессия (10). Однако в этом случае аппроксимация не будет описываться простым аналитическим соотношением, имеющим физический смысл.

## 5. Основные результаты

1. Время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось практически по линейному закону при увеличении расстояния между источником инфразвука и станцией. Средняя по всем трассам скорость прихода инфразвукового сигнала составляла 291 м/с.

2. Зависимость скорости прихода сигнала от расстояния из-за сильного разброса данных наблюдений аппроксимирована константой, равной  $(286 \pm 21.5)$  м/с.

3. Зависимость скорости прихода сигнала от синуса азимутального угла (рассчитанного и оце-

ненного) аппроксимирована линейным законом, из которого оценены средние по всем трассам значения скорости  $(287 \div 288$  м/с) и скорости тропосферно-стратосферного ветра  $(12 \div 14$  м/с).

4. Зависимость длительности инфразвукового сигнала от расстояния аппроксимирована линейным законом. При этом длительность сигнала вблизи источника составляла около 10.7 мин.

5. В спектре инфразвукового сигнала на разных станциях преобладали составляющие с периодом  $T_{\text{amp}}$  примерно от 19 до 85 с или с периодом  $T_{\text{PSD}}$  от 17 до 82 с. Средние значения периодов, полученные по 15 и 13 точкам, составляли  $\overline{T_{\text{amp}}} = 36.73$  с и  $\overline{T_{\text{amp}}} = 37.05$  с,  $\overline{T_{\text{PSD}}} = 39.13$  с и  $\overline{T_{\text{PSD}}} = 35.12$  с соответственно.

6. Построена регрессия для зависимости амплитуды давления в инфразвуковой волне от расстояния. Согласно полученной регрессионной зависимости, скорость убывания амплитуды лишь незначительно превосходила скорость убывания амплитуды при сферической расходимости.

Авторы благодарны коллективу Международного центра данных Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний за возможность использовать первичные данные наблюдений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Материалы международной научно-практической конференции “Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль”*. Под ред. В. А. Алексеева. Челябинск: “Край Ра”, 2013. 168 с.
2. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П., Галкин К. А., Гивишвили Г. В., Глухов Я. В., Давиденко Д. В., Зубачев Д. С., Иванов В. Н., Кархов А. Н., Коломин М. В., Коршунов В. А., Лапшин В. Б., Лещенко Л. Н., Лысенко Д. А., Минлигареев В. Т., Морозова М. А., Перминова Е. С., Портнягин Ю. И., Русаков Ю. С., Сталь Н. Л., Сыроешкин А. В., Тертышников А. В., Тулинов Г. Ф., Чичаева М. А., Чудновский В. С., Штырков А. Ю. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* Москва: ФГБУ “ИПП”, 2013. 37 с.
3. Grigoryan S. S., Ibadov F. S., and Ibadov S. I. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Sol. Syst. Res.* 2013. Vol. 47, No. 4. P. 268–274. DOI: 10.1134/S0038094613040151
4. *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47, № 4. (Тематический выпуск).
5. *Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. 694 с.



6. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шуств Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года. *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47, № 4. С. 262–277.
7. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных. *Динамические процессы в геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН*. Москва: Геос, 2013. Вып. 4. С. 10–21.
8. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gislser G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., and Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. Vol. 342, Is. 6162. P. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
9. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gislser G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., and Mikouchi T. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. Vol. 342. URL: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1) (дата обращения 30.01.2017).
10. Chernogor L. F. and Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2013. Vol. 86, No. 4. P. 136–139.
11. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела. *Материалы международной научно-практической конференции "Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль"* (Чебаркуль, 21–22 июня 2013 г.). Челябинск: Край Па, 2013. С. 148–152.
12. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита "Челябинск". *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23–40.
13. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 10. С. 97–104.
14. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Из-во "Каменный пояс". 2014. С. 229–264.
15. Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., and Brachet N. The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40, Is. 14. P. 3732–3737. DOI: 10.1002/grl.50619
16. Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А., Соловьев А. В., Русаков Ю. С., Глухов А. Г., Силбер И., Подобная Е. Д., Суркова Д. В. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям. *Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. тр. ИДГ РАН*. Москва: Геос, 2013. Вып. 4. С. 21–32.
17. Сорокин А. Г. Инфразвуковое излучение Челябинского метеороида. *Солнечно-земная физика*. 2013. №. 24. С. 58–63.
18. Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А. Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления // *Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. тр. ИДГ РАН*. Москва: Геос, 2014. Вып. 5. С. 78–86.
19. Avramenko M. I., Glazyrin I. V., Ionov G. V., and Karpееv A. V. Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. Vol. 119, Is. 12. P. 7035–7050. DOI: 10.1002/2013JD021028
20. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22. № 1. С. 53–66. DOI: 10.15407/rpra22.01.053
21. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Статистические характеристики метеороидов метрового размера в атмосфере Земли. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Радіофізика та електроніка"*. 2017. Вип. 26. С. 80–83.
22. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2017. №8. С. 427–436.
23. Черногор Л. Ф., Ляшук А. И. Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. *Кинематика и физика небесных тел*. 2017. Т. 33, № 2. С. 60–72.
24. Christie D. R. and Campus P. The IMS infrasound network: Design and establishment of infrasound stations. In: A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, eds. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Dordrecht: Springer, 2010. P. 27–73.
25. ReVelle D. O. Historical Detection of Atmospheric Impacts by Large Bolides Using Acoustic-Gravity Waves. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1997. Vol. 822, Is. 1. P. 284–302. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1997.tb48347.x
26. Edwards W. N., Brown P. G., and ReVelle D. O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68, Is. 10. P. 1136–1160. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.02.010

REFERENCES

1. ALEKSEEV, V. A., ed. 2013. *Proceedings of the international scientific-practical conference "Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the meteorite falling into the lake Chebarkul"*. Chelyabinsk, Russia: Krai Ra Publ. (in Russian).
2. ALPATOV, V. V., BUROV, V. N., VAGIN, J. P., GALKIN, K. A., GIVISHVILI, G. V., GLUHOV, J. V., DAVIDENKO, D. V., ZUBACHEV, D. S., IVANOV, V. N., KARHOV, A. N., KOLOMIN, M. V., KORSHUNOV, V. A., LAPSHIN, V. B., LESHENKO, L. N., LYSENKO, D. A., MINLIGAREEV, V. T., MOROZOVA, M. A., PERMINOVA, E. S., PORTNYAGIN, J. I., RUSAKOV, J. S., STAL, N. L., SYROESHKIN, A. V., TERTYSHNIKOV, A. V., TULINOV, G. F., CHICHAEVA, M. A., CHUDNOVSKY, V. S. and SHTYRKOV, A. Y., 2013. *Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013*. Moscow, Russia: FGBU "IPG" Publ. (in Russian).
3. GRIGORYAN, S. S., IBODOV, F. S. and IBADOV, S. I., 2013. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Sol. Syst. Res.* vol. 47, no. 4, pp. 268–274. DOI: 10.1134/S0038094613040151
4. SOLAR SYSTEM RESEARCH. 2013. vol. 47, no. 4. (*Thematical issue*).
5. ANTIPIN, N. A., ed. 2014. *The Chelyabinsk Meteorite – one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ. (in Russian).
6. EMEL'YANENKO, V. V., POPOVA, O. P., CHUGAI, N. N., SHELYAKOV, M. A., PAKHOMOV, YU. V., SHUSTOV, B. M., SHUVALOV, V. V., BIRYUKOV, E. E., RYBNOV, YU. S., MAROV, M. YA., RYKHLOVA, L. V., NAROENKOV, S. A., KARTASHOVA, A. P., KHARLAMOV, V. A. and TRUBETSKAYA, I. A., 2013. Astronomical and physical aspects of Chelyabinsk event (February 15, 2013). *Sol. Syst. Res.* vol. 47, is. 4, pp. 240–254. DOI: 10.1134/S0038094613040114
7. POPOVA, O. P., SHUVALOV, V. V., RYBNOV, Y. S., HARLAMOV, V. A., GLAZACHEV, D. O., EMELIANENKO, V. V., KARTASHOVA, A. P. and JENNISKENS, P., 2013. Chelyabinsk meteoroid parameters: Data analysis. In: *Dinamicheskie protsessy v geosferah: sb. nauch. tr. IDG RAN*. Moscow, Russia: Geos Publ. is. 4, pp. 10–21 (in Russian).
8. POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELIANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. G., KUIPER, J., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHENKO, A. V., SCHMITT-KOPPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. vol. 342, is. 6162, pp. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
9. POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELIANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. G., KUIPER, J., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHENKO, A. V., SCHMITT-KOPPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science* [online]. vol. 342. [viewed 30 January 2017]. Available from: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1)
10. CHERNOGOR, L. F. and ROZUMENKO, V. T., 2013. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Technol.* vol. 86, no. 4, pp. 136–139.
11. CHERNOGOR, L. F., 2013. The main physical effects associated with the Chelyabinsk bolide passage. In: *Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the meteorite falling into the lake Chebarkul: Proceedings of the international scientific-practical conference*. Chelyabinsk, Russia: Krai Ra Publ., pp. 148–152 (in Russian)
12. CHERNOGOR, L. F., 2013. Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaya fizika*. no. 8, pp. 23–40 (in Russian).
13. CHERNOGOR, L. F., 2013. Physical effects caused by flight of Chelyabinsk meteoroid. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini*. no. 10, pp. 97–104 (in Russian).
14. CHERNOGOR, L. F., 2014. Main effects of Chelyabinsk meteorite falling: physics and mathematics calculation results. In: ANTIPIN, N. A., ed. *The Chelyabinsk Meteorite – one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ., pp. 229–264 (in Russian).
15. LE PICHON, A., CERANNA, L., PILGER, C., MIALLE, P., BROWN, D., HERRY, P. and BRACHET, N., 2013. The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophys. Res. Lett.* vol. 40, is. 14, pp. 3732–3737. DOI: 10.1002/grl.50619
16. RYBNOV, Y. S., POPOVA, O. P., HARLAMOV, V. A., SOLOVIEV, A. V., RUSAKOV, Y. S., GLUKHOV, A. G., SILBER, E., PODOBNAYA, E. D. and SURKOVA, D. V., 2013. Energy estimation of Chelyabinsk bolide using infrasound measurements. In: *Dinamicheskie protsessy v geosferah: sb. nauch. tr. IDG RAN*. Moscow, Russia: Geos Publ. is. 4, pp. 22–31 (in Russian).

- sferah: Sb. nauch. tr. IDG RAN.* Moscow, Russia: Geos Publ. is. 4, pp. 21–32 (in Russian).
17. SOROKIN A. G., 2014. On infrasonic radiation of Chelyabinsk meteoroid. *Solnechno-zemnaya fizika.* vol. 24, pp. 58–63 (in Russian).
  18. RYBNOV, Yu. S., POPOVA, O. P. and HARLAMOV, V. A., 2014. The energy estimation of the Chelyabinsk meteoroid by the power spectra of long-periods oscillations of the atmospheric pressure. In: *Dinamicheskie protsessy v geosferah: Sb. nauch. tr. IDG RAN.* Moscow, Russia: Geos Publ. is. 5, pp. 78–86 (in Russian).
  19. AVRAMENKO, M. I., GLAZYRIN, I. V., IONOV, G. V. and KARPEEV A. V., 2014. Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide. *J. Geophys. Res. Atmos.* vol. 119, is. 12, pp. 7035–7050. DOI: 10.1002/2013JD021028
  20. CHERNOGOR, L. F., 2017. Chelyabinsk Meteoroid Acoustic Effects. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 1, pp. 53–66 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.01.053
  21. CHERNOGOR, L. F. and SHEVELEV, M. B., 2017. Statistical Characteristics of Meter-Size Celestial Bodies in Earth's Atmosphere. *Visnyk Kharkivs'kogo natsional'nogo universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya "Radiofizyka ta elektronika".* vol. 26, pp. 80–83 (in Russian).
  22. LAZORENKO, O. V. and CHERNOGOR, L. F., 2017. System Spectral Analysis of Infrasonic Signal Generated by Chelyabinsk Meteoroid. *Radioelectron. Commun. Syst.* vol. 60, is. 8, pp. 331–338. DOI: 10.3103/S0735272717080015
  23. CHERNOGOR, L. F. and LIASHCHUK, A. I., 2017. Parameters of Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk Meteoroid on February 15, 2013. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* vol. 33, no. 2, pp. 79–87.
  24. CHRISTIE, D. R. and CAMPUS, P., 2010. The IMS infrasound network: Design and establishment of infrasound stations. In: A. LE PICHON, E. BIANC, A. HAUCHECORNE, eds. *Infrasound monitoring for atmospheric studies.* Dordrecht: Springer, pp. 27–73.
  25. REVELLE, D. O., 1997. Historical Detection of Atmospheric Impacts by Large Bolides Using Acoustic-Gravity Waves. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* vol. 822, is. 1, pp. 284–302. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1997.tb48347.x
  26. EDWARDS, W. N., BROWN, P. G. and REVELLE, D. O., 2006. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 68, is. 10, pp. 1136–1160. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.02.010

L. F. Chernogor and N. B. Shevelev

V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

#### CHARACTERISTICS OF THE INFRASOUND SIGNAL GENERATED BY CHELYABINSK CELESTIAL BODY: GLOBAL STATISTICS

*Purpose:* The investigation subject is the statistical characteristics of the infrasound signal generated during the passage and airburst of the Chelyabinsk celestial body on February 15, 2013. The parameters under study include the time delay, amplitude,

duration, period, celerity and its dependence on the distance to the epicentre of the airburst from the observation site and on the back-azimuth angle of arrival.

The study aims at constructing correlation diagrams for the signal celerity and the distance, the signal celerity and the sine of the back-azimuth angle of arrival, the signal duration and the distance, the signal amplitude and the distance, the period and the period for the periods determined by two techniques, and at fitting simple analytical relations to the diagrams obtained. Here, the distance refers to the distance between the infrasound source and the infrasound station where the infrasound is observed.

*Design/methodology/approach:* The data retrieved from the US Department of Defence, the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization's International Monitoring System database are used to determine approximate relations for the basic characteristics of the infrasound signal generated by the passage and airburst of the Chelyabinsk celestial body on February 15, 2013.

*Findings:* The correlation diagrams for the infrasound signal celerity and the distance between the source and an observation station have been shown to exhibit a significant scatter with a mean of  $(286.0 \pm 21.5) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . The model fits of the infrasound signal celerity to the signal duration, to the back-azimuth angle of arrival, and to the distance between the source and an observation station, as well as the model fit of the signal amplitude to distance, are determined. The correlation diagrams for the main oscillation periods obtained by two different techniques are constructed.

*Conclusions:* The infrasound signal time delay increases virtually linearly with the distance between the infrasound source and the station. The infrasound signal celerity averaged over all paths is equal to  $291 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . The celerity dependence on distance is fit with a constant due to a large data scatter. The celerity dependence on the sine of the back-azimuth angle of arrival, both calculated and estimated, is fit with a straight line that gives mean values of the celerity  $(287 - 288 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$  and troposphere-stratosphere winds  $(12 - 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$  along all paths. The dependence of the infrasound signal duration on distance is fit with a straight line, and the signal duration near the source is found to be 10.7 min. The spectral components with a period within 17 to 85 s predominate in the infrasound signal spectrum, and the period mean values estimated by employing different techniques vary from 35 to 39 s.

*Key words:* Chelyabinsk meteoroid, signal time delay, celerity, signal duration, signal amplitude, signal period, model fit

Л. Ф. Черногор, М. Б. Шевелев

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ, ЗГЕНЕРОВАНОГО ЧЕЛЯБІНСЬКИМ КОСМІЧНИМ ТІЛОМ: ГЛОБАЛЬНА СТАТИСТИКА

*Предмет і мета роботи:* Предмет дослідження – статистичні характеристики інфразвукового сигналу (час запізнення; швидкість приходу та її залежність від відстані між джерелом і місцем реєстрації, а також від азимуту; тривалість; період і амплітуда), згенерованого при прольоті та вибуху Челябінського космічного тіла 15 лютого 2013 р.

Метою роботи є побудова кореляційних полів “швидкість приходу сигналу – відстань”, “швидкість приходу сигналу – синус азимуту”, “тривалість сигналу – відстань”, “амплітуда сигналу – відстань” та “період – період” для періодів, оцінених за двома методиками, а також їх апроксимація простими аналітичними співвідношеннями. Термін “відстань” тут відноситься до відстані між джерелом інфразвуку та реєструючою його станцією.

*Методи та методологія:* З використанням бази даних інфразвукової системи моніторингу (IMS) ядерних випробувань, що належить Організації щодо Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (СТВТО), отримано апроксимуючі залежності для основних характеристик інфразвукового сигналу, згенерованого при прольоті та вибуху Челябинського космічного тіла 15 лютого 2013 р.

*Результати:* Показано, що кореляційне поле “швидкість приходу інфразвукового сигналу – відстань між джерелом та станцією” має значний розкид, середнє значення швидкості складає  $(286.0 \pm 21.5)$  м/с. Отримано апроксимуючі залежності для швидкості приходу інфразвукового сигналу від відстані між джерелом та станцією, а також від азимуту джерела, для тривалості та амплітуди сигналу від відстані. Побудовано кореляційне поле для періодів основного коливання, оціненого за двома різними методиками.

*Висновки:* Час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався практично за лінійним законом зі збільшенням відстані між джерелом інфразвуку та станцією. Середня на всіх трасах швидкість приходу інфразвукового сигналу складала 291 м/с. Залежність швидкості приходу від відстані через сильний розкид даних спостережень апроксимовано константою. Залежність швидкості приходу від синусу азимутального кута (розрахованого та оціненого) апроксимовано лінійним законом, з якого оцінено середнє на всіх трасах значення швидкості  $(287 \div 288)$  м/с та швидкості тропосферно-стратосферного вітру  $(12 \div 14)$  м/с. Залежність тривалості інфразвукового сигналу від відстані апроксимовано лінійним законом. При цьому тривалість сигналу поблизу джерела складала близько 10.7 хв. У спектрі інфразвукового сигналу на різних станціях переважали складові з періодом приблизно від 17 до 85 с. Середні значення періодів, отримані за різними методиками, змінювались приблизно від 35 до 39 с.

*Ключові слова:* Челябинський метеороїд, час запізнення сигналу, швидкість приходу, тривалість сигналу, амплітуда сигналу, період сигналу, апроксимуючі залежності

*Стаття постуила в редакцію 10.01.2018*