

УДК 551.558, 551.596, 534.221

Л. Ф. Черногор, Н. Б. Шевелев

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

Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г.

На основе данных наблюдений инфразвукового сигнала, зарегистрированного 17 станциями, проведен статистический анализ основных параметров сигнала (времени запаздывания, скорости прихода, длительности, периода колебаний и амплитуды) в зависимости от горизонтального расстояния между областью свечения Индонезийского суперболида и местом расположения инфразвуковой станции. Приведены аппроксимирующие зависимости параметров сигнала от расстояния. Построены и проанализированы корреляционные поля. Оценены основные параметры метеороида, скорректированное значение скорости прихода инфразвукового сигнала и средней скорости тропосферно-стратосферного ветра.

Ключевые слова: метеороид, инфразвуковой сигнал, основные параметры, аппроксимирующие зависимости.

ВВЕДЕНИЕ

Падение каждого достаточно крупного космического тела вызывает значительный интерес у астрономов, геофизиков, радиофизиков, сейсмологов и других специалистов. Особый интерес представляло вторжение в атмосферу Земли Челябинского метеороида, имевшего место 15 февраля 2013 г. Диаметр тела был близок к 18 м, а начальная кинетическая энергия составляла около 440 кт ТНТ [10]. Пролет и взрыв метеороида вызвал возмущения во всех геоболочках системы «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» [2, 3]. От ударной волны пострадало более 1600 человек.

Менее масштабным и менее известным был пролет и взрыв метеороида над Индонезией 8 октября 2009 г. [12, 13]. Как известно, боль-

шинство вторжений космических тел в атмосферу Земли имеет место над Мировым океаном. Таким было и вторжение метеороида 8 октября 2009 г. В этих случаях оптические и сейсмические наблюдения не проводились. Наиболее эффективными оказываются инфразвуковые и спутниковые измерения. Они несут информацию об энергетике метеороида и параметрах акустического сигнала (его амплитуде, скорости прихода, спектральном составе, длительности и т. п.).

Целью настоящей работы является анализ основных параметров инфразвукового сигнала, сгенерированного уникальным метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. Факт падения наблюдался многими очевидцами, зарегистрирован спутниками США, а также любительскими камерами. К уникальности данного события следует отнести его значительную энергетiku (33 кт ТНТ), а также регистрацию сгенерированного метеороидом инфразвука 17 (из 42) станциями глобальной Международной системы мониторинга сети СТВТО [<http://www.ctbto.org>]. Сигнал был зарегистрирован в очень широком диапазоне горизонтальных расстояний от места взрыва метеороида: примерно от 2 до 17.5 Мм. Только для Челябинского метеороида максимальное расстояние превышало 17.5 Мм (для обратного сигнала оно составляло около 25 Мм [12, 13]).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНДОНЕЗИЙСКОМ СУПЕРБОЛИДЕ

По данным работ [12, 13] метеороид вторгся в атмосферу Земли в 02:57 UT или в 10:57 местного времени и взорвался над точкой с координатами $\lambda = 4.9^\circ \text{ S}$, $\phi = 122.0^\circ \text{ E}$ (средняя ошибка 2.9°). Начальная кинетическая энергия метеороида составляла 70 ± 20 кт ТНТ, диаметр — 8...10 м, а масса — не более 6 тыс. т. Средний интервал времени T_m между двумя падениями таких тел — 10...22 лет [12, 13].

По данным НАСА [<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>] координаты области максимального свечения составляли 4.2° S , 120.6° E , а энергия свечения — 20 ТДж. Тогда начальная кинетическая энергия была близка к 33 кт ТНТ, а начальная скорость — к 19.2 км/с. Взрыв метеороида имел место на высоте 19.1 км. При этом, согласно соотношению из работы [7], $T_m = 5.6$ лет.

Сведения о координатах λ , ϕ , инфразвуковых станций, зарегистрировавших сигнал, произведенный метеороидом, их удаление r от места генерации инфразвука, а также наблюдаемый и истинный азимуты источника инфразвука приведены в табл. 1, построенной по данным работ [12, 13]. В табл. 2 перечислены основные параметры инфразвукового сигнала, полученные в этих работах.

Данные табл. 1 и 2 далее будут использованы для статистического анализа и аппроксимации зависимостей основных параметров инфразвукового сигнала от расстояния, а также зависимости скорости прихода сигнала от азимута источника.

Таблица 1. Основные сведения об инфразвуковых станциях

Станция	, град	, град	r , Мм	$A_{вр}$, град	$A_{об}$, град
I39PW	7.5N	134.5E	2.099	230	264
I07AU	19.9S	134.3E	2.291	316	318
I04AU	34.6S	116.4E	3.35	7	9
I30JP	35.3N	140.3E	4.92	210	211
I05AU	42.5S	147.7E	5.009	319	319
I22FR	22.2S	166.8E	5.386	284	285
I45RU	44.2N	132.0E	5.543	196	197
I46RU	53.9N	84.8E	7.296	222	224
I44RU	53.1N	157.7E	7.323	141	141
I55US	77.7S	167.6E	8.577	311	305
I53US	64.9N	147.9W	10.573	270	270
I26DE	48.8N	13.7E	11.594	80	80
I18DK	6.7N	4.9W	11.9	350	340
I56US	48.3N	117.1W	12.767	293	322
I13CL	15.3N	23.2W	13.636	244	240
I17CI	33.7S	78.8W	13.926	91	87
I08BO	16.2S	68.5W	17.509	203	218

Сравнение основных параметров Индонезийского метеороида с параметрами других метеороидов с начальной кинетической энергией более 10 кт ТНТ приведено в табл. 3. Судя по высоте максимального свечения, все космические тела, скорее всего, были каменными размером от 4.4 до 7.9 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Время запаздывания сигнала. Время запаздывания сигнала t оценивалось как разность моментов времени прихода переднего фронта инфразвукового сигнала и времени пролета метеороида. Зависимость t от горизонтального расстояния r между местом вспышки болида и местом расположения инфразвуковой станции приведена на рис. 1. Видно, что время t увеличивалось от 103 до 957 мин при увеличении r от 2.099 до 17.509 Мм. Средняя скорость прихода сигнала для всех

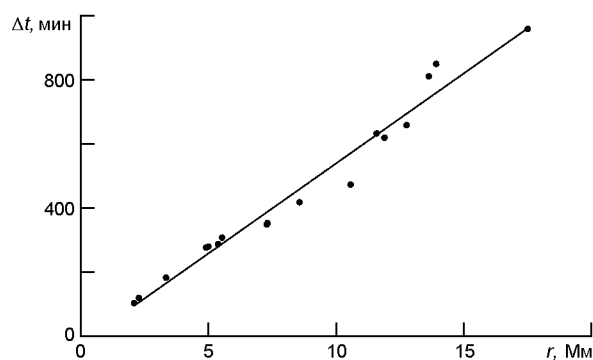


Рис. 1. Зависимость времени запаздывания сигнала от расстояния между местом вспышки болида и инфразвуковой станцией. Аппроксимация линейным законом $t = 56.09r - 23.44$, $R = 0.99$, $t = 45.16$ мин

трасс $v = dr / dt = 297$ м/с. Зависимость времени запаздывания сигнала можно аппроксимировать следующим соотношением:

$$t = 56.09r - 23.44, R = 0.99, \quad 45.16 \text{ мин.} \quad (1)$$

Здесь t дается в мин, а r — в Мм. Видно, что при этом коэффициент достоверности $R = 0.99$, а среднее квадратичное отклонение аппроксимации — 45.16 мин.

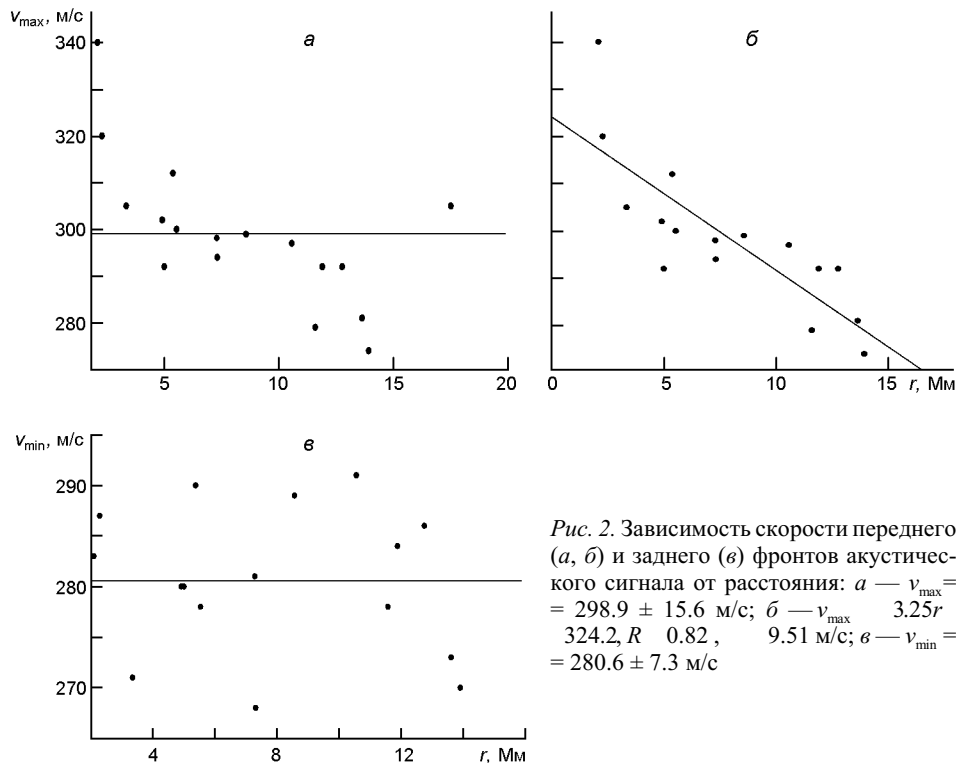
Скорость прихода сигнала. Имеет смысл отдельно рассмотреть зависимости скорости прихода переднего (v_{\max}) и заднего (v_{\min}) фронтов инфразвукового сигнала от пройденного расстояния (рис. 2а и 2б). Видно, что имеет место значительный разброс точек. Обе зависимости аппроксимировались константами:

$$v_{\max} = 298.9 \pm 15.6 \text{ м/с,}$$

$$v_{\min} = 280.6 \pm 7.3 \text{ м/с.}$$

Заметим, что для двух ближайших станций ($r = 2.099$ и 2.291 Мм) скорости v_{\max} , равные 340 и 320 м/с, заметно отличались от среднего значения (около 297 м/с). Это же можно сказать и для станции, удаленной на расстояние 13.926 Мм, для которой $v_{\max} = 274$ м/с.

Если предположить, что v_{\max} зависит от r , и исключить станцию, для которой $r = 17.509$ Мм, $v_{\max} = 305$ м/с, то аппроксимирующая зависимость приобретает вид (см. рис. 2б)



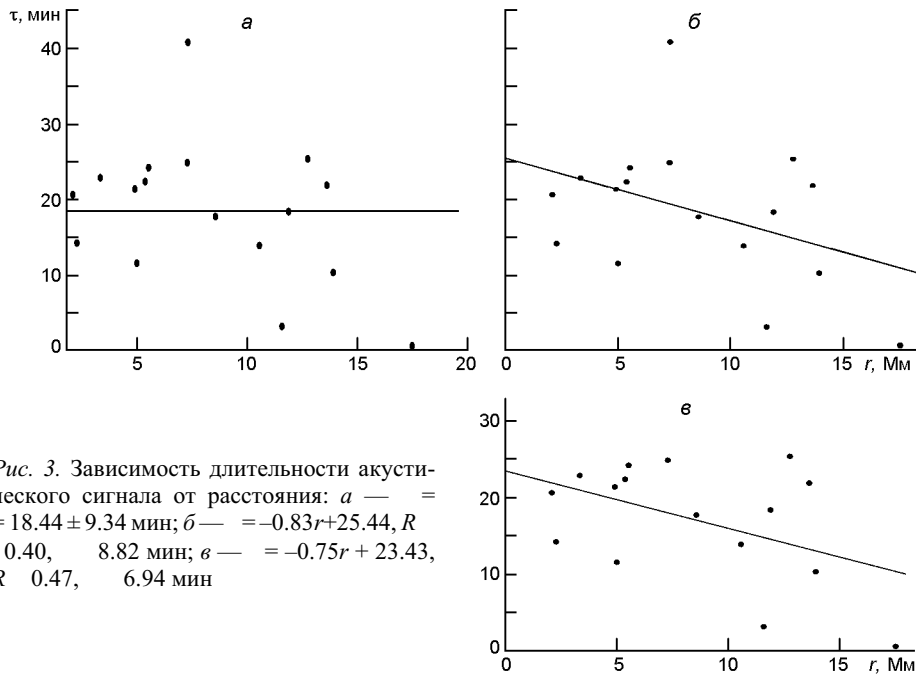


Рис. 3. Зависимость длительности акустического сигнала от расстояния: а — $\tau = 18.44 \pm 9.34$ мин; б — $\tau = -0.83r + 25.44$, $R = 0.40$, $\tau = 8.82$ мин; в — $\tau = -0.75r + 23.43$, $R = 0.47$, $\tau = 6.94$ мин

$$v_{\max} = 3.25r - 324.2, R = 0.82, v = 9.51 \text{ м/с.}$$

Длительность сигнала. Зависимость длительности инфразвукового сигнала от расстояния показана на рис. 3, из которого видно, что имеет место заметный разброс точек. Вначале указанная зависимость аппроксимировалась следующим соотношением (рис. 3а):

$$\tau = 18.44 \pm 9.34 \text{ мин.}$$

Значительные отклонения от среднего значения отмечались для станций, удаленных на расстояния 7.323, 13.926 и 17.509 Мм.

Если отказаться от предположения, что $\tau(r) = \text{const}$, то зависимость $\tau(r)$ может быть аппроксимирована следующими зависимостями (см. рис. 3б и 3в):

$$\begin{aligned} \tau &= 0.83r - 25.44, R = 0.40, \tau = 8.82 \text{ мин,} \\ \tau &= 0.75r - 23.43, R = 0.47, \tau = 6.94 \text{ мин.} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь τ измеряется в минутах, а r — в Мм. Зависимость (2) получена после исключения станции, для которой $r = 7.323$ Мм и $\tau = 40.8$ мин. Видно, что значения R в обоих случаях относительно невелики.

Период колебаний. Период основных колебаний T в работах [12, 13] оценивался при помощи двух независимых методик — РМСС [8] и MatSeis 1.7 [9, 14], причем во втором случае оценки основывались на анализе спектральной плотности мощности (T_2) и амплитуды (T_3). Период, оцененный при помощи РМСС-методики, обозначим как T_1 (см. табл. 2).

Таблица 2. Основные сведения о параметрах инфразвукового сигнала

Станция	t , мин	r , м	v_{\min} , м/с	v_{\max} , м/с	p_1 , Па	p_2 , Па	T_1 , с	T_2 , с	T_3 , с
I39PW	103	1235	283	340	—	0.785	—	13.65	14.87
I07AU	119	850	287	320	1.4115	1.5455	6.96	7.88	5.79
I04AU	182	1370	271	305	0.2355	0.263	5.36	7.31	7.11
I30JP	276	1280	280	302	0.321	0.30385	25.6	7.88	7.89
I05AU	279	690	280	292	0.271	0.437	10.5	29.26	25.23
I22FR	287	1340	290	312	0.0825	0.0635	5.3	20.48	21.07
I45RU	307	1450	278	300	0.596	0.59365	10.7	17.07	19.79
I46RU	348	1490	281	298	0.4015	—	15.2	—	—
I44RU	352	2450	268	294	0.1815	0.3948	6.99	18.62	18.29
I55US	417	1060	289	299	0.084	0.0725	12.1	17.07	17.62
I53US	472	830	291	297	0.244	0.209	12.7	12.8	14.66
I26DE	631	185	278	279	0.02	—	5.48	—	—
I18DK	618	1100	284	292	0.3465	0.3225	18.1	25.6	21.81
I56US	657	1520	286	292	0.3825	0.382	14.7	13.65	11.83
I13CL	809	1310	273	281	0.309	0.303	12.1	11.38	11.31
I17CI	848	615	270	274	0.064	0.06735	12.1	9.31	8.64
I08BO	957	30	—	305	—	0.4665	—	17.07	16.34

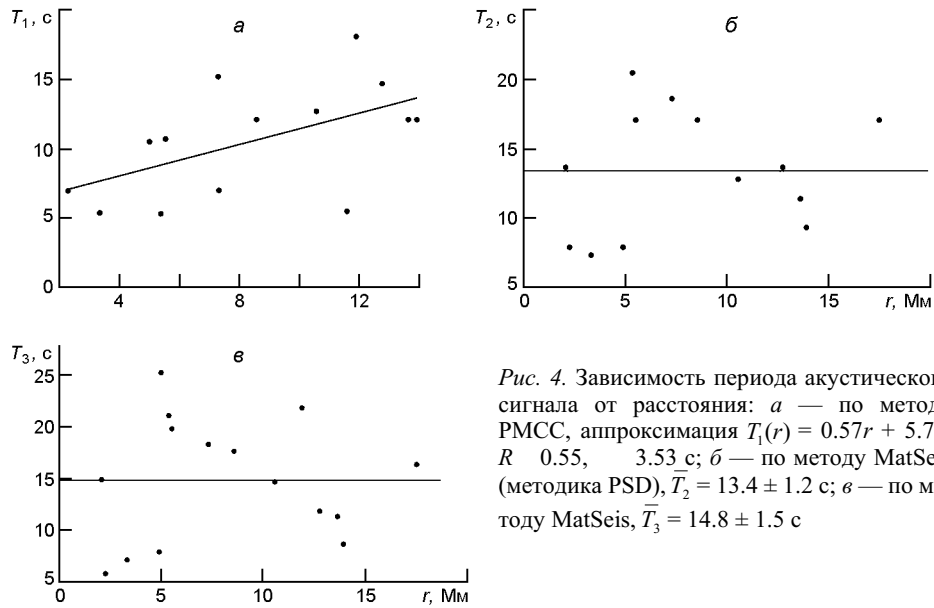


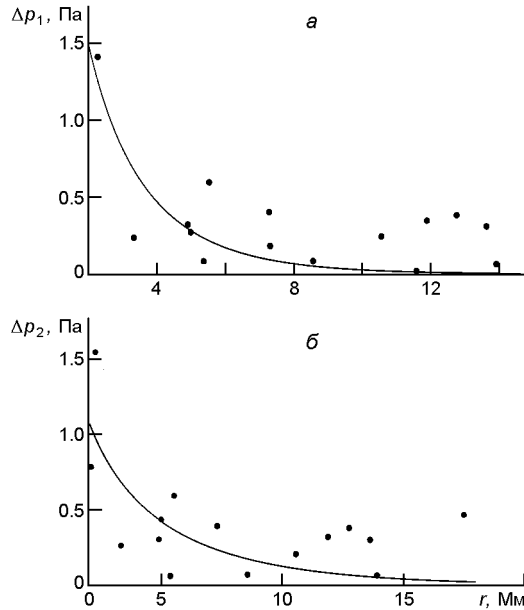
Рис. 4. Зависимость периода акустического сигнала от расстояния: а — по методу РМСС, аппроксимация $T_1(r) = 0.57r + 5.76$, $R = 0.55$, $\sigma = 3.53$ с; б — по методу MatSeis (методика PSD), $\bar{T}_2 = 13.4 \pm 1.2$ с; в — по методу MatSeis, $\bar{T}_3 = 14.8 \pm 1.5$ с

Зависимость периода колебаний от расстояния приведена на рис. 4. Из рис. 4а видно, что значения T_1 имеют относительно небольшой разброс. Зависимость $T_1(r)$ после исключения значения 25.6 с можно аппроксимировать таким соотношением:

$$T_1 = 0.57r + 5.76, R = 0.55, \sigma = 3.53 \text{ с}, \quad (3)$$

где r измеряется в Мм, а T_1 — в с. При увеличении r от 2 до 14 Мм значение T_1 увеличивается от 6.9 до 13.7, т. е. примерно вдвое. Среднее значение $\bar{T}_1 = 10.6 \pm 1.1$ с.

Рис. 5. Зависимость флуктуаций давления акустического сигнала, сгенерированного Индонезийским метеороидом, от расстояния: *a* — по методу РМСС, аппроксимация законом $p_1 = 4.84r^{0.52}e^{0.40r}$, $R = 0.66$, 0.26 Па; *б* — согласно методу MatSeis, $p_2 = 2.22r^{0.49}e^{0.18r}$, $R = 0.69$, 0.29 Па



Как видно из рис. 4б, разброс точек значителен. Из-за этого зависимость $T_2(r)$ не удалось аппроксимировать подходящим соотношением. Среднее значение \bar{T}_2 после исключения значений 29.26 и 25.60 с составляет 13.4 ± 1.2 с.

Зависимость $T_3(r)$ также характеризуется значительным разбросом точек (рис. 4в). Среднее значение $\bar{T}_3 = 14.8 \pm 1.5$ с.

Амплитуда сигнала. Зависимость амплитуд p_1 и p_2 инфразвукового сигнала от r с использованием методик РМСС и MatSeis, приведена на рис. 5. В интервале расстояний $r = 2...12$ Мм удовлетворительными являются следующие зависимости:

$$p_1 = 4.84r^{0.52}e^{0.40r}, R = 0.66, 0.26 \text{ Па}, \quad (4)$$

$$p_2 = 2.22r^{0.49}e^{0.18r}, R = 0.69, 0.29 \text{ Па}, \quad (5)$$

где r дается в Мм, а p_1 и p_2 — в Па. При $r = 12...18$ Мм аппроксимации заметно занижают значения амплитуд.

Зависимость скорости переднего фронта сигнала от азимута. Зависимость скорости v_{\max} от синуса азимутального угла A приведена на рис. 6. Поскольку скорость прихода инфразвукового сигнала зависит от направления трассы, а значит и от полушария, в котором находится инфразвуковая станция, имеет смысл рассмотреть зависимость v_{\max} от $\sin A$ отдельно для южного и северного полушарий. Для этих полушарий аппроксимирующие зависимости имеют вид:

$$v_{\max}(\sin A_{tr}) = 15.87 \sin A_{tr} + 295.68, R = 0.73, 11.15 \text{ м/с}, \quad (6)$$

$$v_{\max}(\sin A_{tr}) = 3.98 \sin A_{tr} + 291.53, R = 0.35, 8.03 \text{ м/с}. \quad (7)$$

Заметим, что достоверность аппроксимации (7) — невысокая.

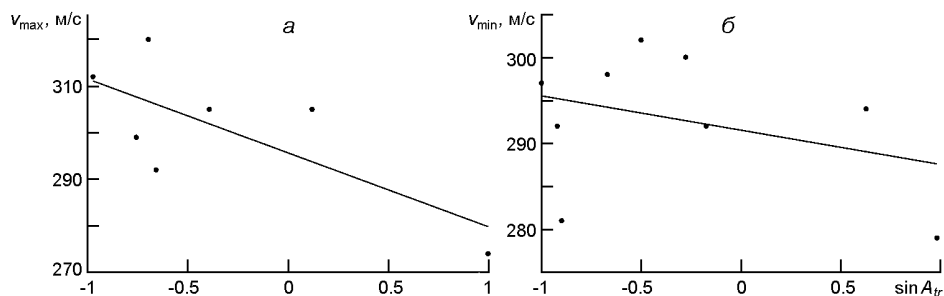


Рис. 6. Зависимость скорости переднего фронта инфразвукового сигнала от синуса истинного азимута: *а* — для станций, расположенных в южном полушарии, аппроксимация линейным законом $v_{\max}(\sin A_{tr}) = -15.87 \sin A_{tr} + 295.68$, $R = 0.73$, 11.15 м/с; *б* — для станций, расположенных в северном полушарии, аппроксимация линейным законом $v_{\max}(\sin A_{tr}) = -3.98 \sin A_{tr} + 291.53$, $R = 0.35$, 8.03 м/с

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ПОЛЯ

Связь значений минимальной и максимальной скоростей прихода инфразвукового сигнала. Корреляционная зависимость v_{\max} от v_{\min} представлена на рис. 7. Аппроксимирующее соотношение имеет вид

$$v_{\max} = 0.93v_{\min} + 38.96, R = 0.42, 15.08 \text{ м/с.} \quad (8)$$

Из рис. 7 и выражения (8) видна заметная статистическая связь между упомянутыми параметрами сигнала.

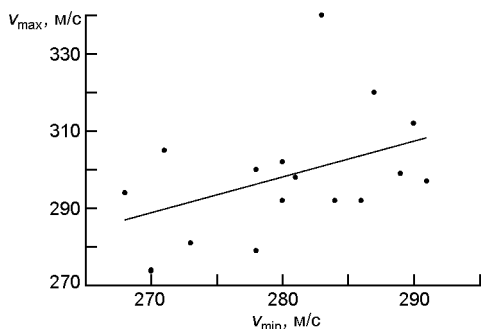


Рис. 7. Корреляционная зависимость скорости переднего фронта v_{\max} от скорости заднего фронта v_{\min} акустического сигнала; аппроксимация линейным законом $v_{\max} = 0.93v_{\min} + 38.96$, $R = 0.42$, 15.08 м/с

Связь значений периодов колебаний, оцениваемых по различными методикам. Поскольку для оценки периода основного колебания в работах [12, 13] применялись три методики (см. выше), представляет интерес выяснение их взаимной согласованности. Для этой цели были построены корреляционные зависимости « $T_1 — T_2$ », « $T_1 — T_3$ » и « $T_2 — T_3$ » (рис. 8). Из рис. 8*а* и 8*б* следует, что статистической связи между оценками T_1 и T_2 , а также T_1 и T_3 фактически нет. В то же время она четко выражена для оценок T_2 и T_3 (рис. 8*в*), что подтвердило аналогичный результат авторов [12]. Аппроксимирующая зависимость имеет вид

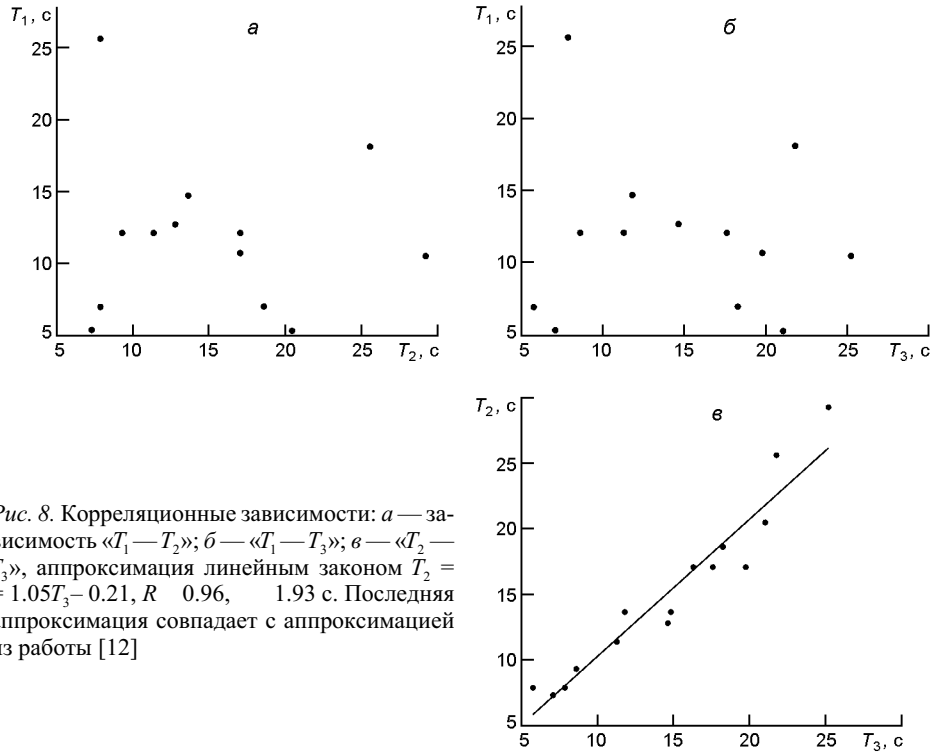


Рис. 8. Корреляционные зависимости: а — зависимость « $T_1—T_2$ »; б — « $T_1—T_3$ »; в — « $T_2—T_3$ », аппроксимация линейным законом $T_2 = 1.05T_3 - 0.21, R = 0.96, 1.93$ с. Последняя аппроксимация совпадает с аппроксимацией из работы [12]

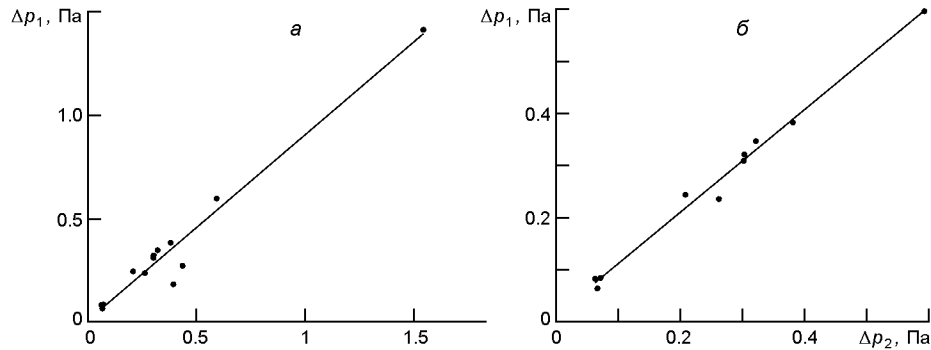


Рис. 9. Корреляционное поле оценок p_1 и p_2 : а — построенное по 13 станциям, аппроксимация линейным законом $p_1 = 0.90 p_2 + 0.01, R = 0.98, 0.15$ Па; б — построенное по 10 станциям, аппроксимация линейным законом $p_1 = 0.99 p_2 + 0.01, R = 0.99, 0.02$ Па

$$T_2 = 1.045T_3 - 0.21, R = 0.96, 1.93 \text{ с.}$$

Связь значений амплитуд колебаний, оцениваемых по различным методикам. Для оценки амплитуды колебаний давления в инфразвуковой волне в работах [12, 13] применялись две методики (p_1 и p_2). Выясним их взаимное соответствие. Корреляционная зависимость p_1 от p_2 приведена на рис. 9. Аппроксимирующие зависимости в случае использования 13 и 10 станций соответственно имеют вид

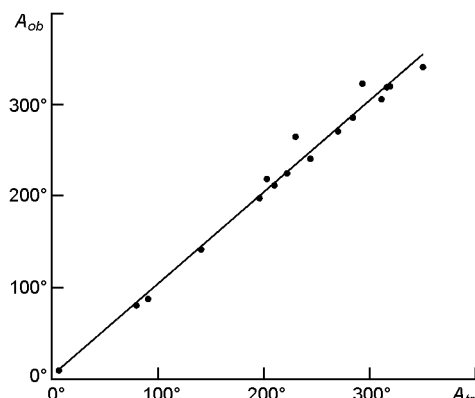


Рис. 10. Зависимость наблюдаемого азимута A_{ob} от истинного (A_{tr}). Аппроксимация линейным законом $A_{ob} = 1.00A_{tr} + 2.98$, $R = 0.99$, 12.03 м/с

$$p_1 = 0.90 \quad p_2 = 0.01, \quad R = 0.98, \quad 0.15 \text{ Па.}$$

$$p_1 = 0.99 \quad p_2 = 0.01, \quad R = 0.99, \quad 0.02 \text{ Па.}$$

Видно, что есть устойчивая статистическая связь между амплитудами колебаний.

Связь значений истинного и наблюдаемого азимутов. Корреляционная связь истинного (A_{tr}) и наблюдаемого (A_{ob}) азимутов приведена на рис. 10, из которого видна сильная статистическая связь между A_{tr} и A_{ob} . Аппроксимирующая зависимость имеет вид

$$A_{ob} = 1.00A_{tr} + 2.98, \quad R = 0.99, \quad 12.03 .$$

ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры метеороида. По данным НАСА начальная кинетическая энергия метеороида составляла 33 кт ТНТ = 138 ТДж, а начальная скорость $v_0 = 19.2$ км/с [<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>]. При этом начальная масса космического тела была близкой к 750 т.

Оценку начальной кинетической энергии метеороида можно получить из инфразвуковых наблюдений. При $E/2 = 100$ кт ТНТ имеем эмпирическое соотношение [11]

$$\lg(E/2) = 3.34 \lg T - 2.58.$$

Результаты оценивания E по средним значениям T_1, T_2 и T_3 следующие: $E_1 = 9.7...19.4$ кт ТНТ, $E_2 = 22.4...40.7$ кт ТНТ и $E_3 = 29.8...59.5$ кт ТНТ. При этом средние значения составляют: $\bar{E}_1 = 14.0$ кт ТНТ, $\bar{E}_2 = 30.6$ кт ТНТ и $\bar{E}_3 = 42.6$ кт ТНТ. Значения \bar{E}_2 и \bar{E}_3 достаточно близки между собой и к оценке НАСА (33 кт ТНТ).

Полученное значение E подтверждает факт уникальности Индонезийского метеороида. За 34 года спутниковых наблюдений только дважды обнаруживались космические тела с $E = 33$ кт ТНТ, а один раз энергия метеороида превышала это значение E (см. табл. 3).

Таблица 3. Сведения о суперболидах с начальной кинетической энергией E_{k0} 10 кт ТНТ, зафиксированных датчиками НАСА в период с 1994 по 2017 гг. (по материалам сайта <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>)

Дата наблюдения	α , град	δ , град	z_r , км	E_r , ТДж	$ v $, км/с	E , кт ТНТ	m , т
15.02.2013 03:20:33	54.8N	61.1E	23.3	375	18.6	440	11000
25.12.2010 23:24:00	38.0N	158.0E	26	20.0	18.1	33	843
08.10.2009 02:57:00	4.2S	120.6E	19.1	20.0	19.2	33	750
01.02.1994 22:38:09	2.7N	164.1E		18.2		30	
21.11.2009 20:53:00	22.0S	29.2E	38	10.0	32.1	18	146
07.10.2004 13:14:43	27.3S	71.5E	35	10.4	19.2	18	401
06.07.2010 23:54:43	34.1S	174.5W	26	7.56	15.7	14	475
09.12.2006 06:31:12	26.2N	26.0E	26.5	7.41	15.9	14	464
15.04.1988 03:03:10	4.1S	124.3E		7.58		14	
06.02.2016 13:55:09	30.4S	25.5W	31	6.853	15.6	13	447
03.09.2004 12:07:22	67.7S	18.2E	31.5	7.26		13	
30.04.2013 08:40:38	35.5N	30.7W	21.2	5.11	12.1	10	572

Таблица 4. Возможные параметры Индонезийского метеороида в зависимости от его структуры (высоты z_1 и z_2 соответствуют минимальному и максимальному значениям ρ)

Метеороид	ρ , т/м ³	ρ_0 , МПа	z_1 , км	z_2 , км	V , м ³	d , м
Железный	7.7	10...100	21.5	4.2	97.4	5.7
Железокаменный	4.7...5.6	3...30	30.5	13.2	133.9...159.6	6.3...6.7
Каменный	3.3...3.6	1...10	38.7	21.5	208.3...227.3	7.3...7.6
Кометное вещество	0.9	0.01...0.1	73.2	56	833.3	11.7

Состав метеороида неизвестен. Его объемная плотность могла изменяться в широких пределах — от 3.3 т/м³ для каменного метеороида до 7.7 т/м³ для железного метеороида. От значения ρ зависит объем V и диаметр d космического тела (табл. 4).

Наиболее интенсивная вспышка суперболида наблюдалась, по данным НАСА, на высоте z_r 19.1 км. Поскольку на этой высоте плотность воздуха ρ_a 0.1 кг/м³, напряжение разрушения космического тела составляет [1]

$$d_0 = 0.365 (z_r) v_0^2 \approx 11 \text{ МПа.}$$

Такие значения d_0 могут иметь очень прочные монолитные каменные тела, железоканменные или не очень прочные железные тела. Поскольку на высоте z_r скорость несколько меньше, чем v_0 , то $d < 11$ МПа. Поэтому метеороид не мог быть железным. Не мог он состоять и из кометного вещества. В этом случае тело полностью разрушилось бы на высотах более 50...55 км (см. табл. 4). Таким образом, Индонезийский метеороид был или канменным, или железоканменным. Его диаметр (размер) составлял от 6.3 до 7.6 м.

Согласно соотношению из работы [7] число канменных тел, сталкивающихся с Землей в течение года, равно

$$\lg N = (1.568 - 0.03) + (2.70 - 0.08) \lg d,$$

где d дается в метрах. При $d = 7.5$ м имеем $N = 0.127...0.202 \text{ год}^{-1}$, а интервал $T_m = N^{-1} = 5.0...7.9$ лет.

Время запаздывания сигнала. Как и следовало ожидать, при увеличении расстояния между местом вспышки суперболида и местом расположения инфразвуковой станции время запаздывания сигнала (его переднего фронта) увеличивается практически по линейному закону. Средняя скорость прихода сигнала для всех трасс близка к 297 м/с. Естественно, что значение этой скорости зависело от направления и протяженности трассы, вдоль которой распространялся сигнал, и в частности от полушария, в котором располагалась инфразвуковая станция, и направления тропосферно-стратосферного ветра и его силы (см. далее).

Аппроксимация (1) в целом хорошо описывает время запаздывания сигнала при $r = 2...7.5$ Мм, поскольку коэффициент достоверности $R = 0.99$, однако она не является удовлетворительной при $r = 0$. В этом пределе время запаздывания должно стремиться к значению $t_{\min} = 1...3$ мин. Такое значение t_{\min} определяется временем прихода инфразвука от высот, где он генерируется (60...20 км), до поверхности Земли.

Попытка добавить на корреляционное поле точку $r = 0$ и $t_{\min} = 1...3$ мин не привело к улучшению зависимости (1), она осталась практически такой же, лишь незначительно изменились коэффициенты.

Скорость прихода сигнала. Судя по аппроксимациям, в среднем $v_{\max} = 299$ м/с, а $v_{\min} = 280$ м/с. Различие этих скоростей обусловлено значительной протяженностью акустического сигнала — 12...25 мин. В интервале $r = 2...12$ Мм значения этих скоростей практически не зависели от длины трассы. Для ближайших станций, удаленных на 2.099 и 2.291 Мм, значения v_{\max} составляли соответственно 340 и 320 м/с, т.е. заметно превышали среднее значение (299 м/с) и были ближе к скорости звука в однородной приземной атмосфере.

Уменьшение v_{\max} при увеличении расстояния имеет простое физическое объяснение: при увеличении r неизбежно увеличивается путь, проходимый инфразвуковыми лучами при их многократном

отражении от стенок волноводов Земля — стратосфера и Земля — термосфера. При этом увеличивается время запаздывания переднего фронта, а значит уменьшается v_{\max} .

Длительность сигнала. При $v_{\max} = \text{const}$ этот параметр инфразвукового сигнала также практически не зависел от пройденного расстояния и был близок к 18.44 ± 9.34 мин. Такое поведение можно объяснить тем, что спектр инфразвукового сигнала на расстояниях $r = 2 \dots 14$ Мм был достаточно узким, период основного колебания (T_2 или T_3) при этом изменялся незначительно. При этом дисперсия волнового пакета выражена слабо, и дисперсионное расплывание сигнала, как было в случае Челябинского метеороида (для него $T = 10 \dots 100$ с [6]), не наблюдалось. Если же в действительности имела место ситуация, показанная на рис. 2б, то из-за уменьшения v_{\max} с расстоянием длительность сигнала значительно (примерно на 6 мин) изменялась по сравнению со значением 18.44 ± 9.34 мин (см. рис. 3б и 3в).

Добавим, что длительность инфразвукового сигнала 12.24 мин формировалась не протяженностью области генерации, которая составляла около $45 \dots 55$ км, при этом $t_{\min} = 2.5 \dots 3$ мин. Длительность сигнала на самом деле формировалась протяженностью области прихода лучей, распространяющихся по различным траекториям в волноводах Земля — стратосфера и Земля — термосфера.

Средней длительности инфразвукового сигнала 18.44 мин, распространяющегося со скоростью $\bar{v} = 297$ м/с, соответствует характерная длина $L = \bar{v} \cdot 330$ км. На расстоянии $r < L$ имеет место преимущественно лучевое распространение инфразвука, при $r > L$ инфразвуковой сигнал, представляющий собой результат наложения большого количества лучей, распространяется в волноводах Земля — стратосфера и Земля — термосфера. Конечно, основную роль (с точки зрения энергетики) играет стратосферный волновод.

Период колебаний. Значения периода колебаний сильно зависели от методики их оценки, разработанной в исследованиях [8, 9, 14]. Меньше всего флуктуировали значения T_1 (см. рис. 4а). Средние значения составляли $\bar{T}_1 = 10.6 \pm 1.1$ мин, $\bar{T}_2 = 13.4 \pm 1.2$ мин, $\bar{T}_3 = 14.1 \pm 1.4$ мин. Как показал анализ корреляционных полей « $T_1 — T_2$ » и « $T_1 — T_3$ », методика [8] оценивания T_1 является не вполне удачной. Поэтому использование значений T_1 для оценки E нецелесообразно. По этой же причине зависимость $T_1(r)$, даваемая соотношением (3), не соответствует действительности.

Амплитуда сигнала. Согласно аппроксимациям (4) и (5) амплитуда сигнала уменьшается при увеличении длины трассы. Ослабление связано с двумя процессами: расходимостью фронта волны в волноводе Земля — стратосфера и с затуханием в волноводе при отражениях от «стенок» волновода, с рассеянием энергии волны в волноводе и т. п. Легко показать, что в среде без потерь при расходимости фронта волны в волноводе $p \propto r^{-0.5}$ [4]. Действительно, плотность потока энер-

гии инфразвуковой волны p^2 , а площадь боковой поверхности цилиндра при волноводном распространении в волноводе высотой h составляет $S = 2rh$. Поскольку в отсутствие потерь $S = \text{const}$, $p \propto r^{-1/2}$. В наших аппроксимациях показатель степени составляет -0.49 и -0.52 , т.е. очень близок к теоретическому значению, равному -0.50 .

Множитель при r в экспоненте представляет собой коэффициент затухания. При $\alpha = 0.18 \dots 0.40 \text{ Мм}^{-1}$ имеем глубину затухания $l = 1/\alpha$

$2000 \dots 5500 \text{ км}$. На расстоянии l амплитуда инфразвука за счет затухания уменьшается в e раз. Полученное значение l согласуется с имеющимися в литературе данными для инфразвука с периодом $T = 10 \dots 15 \text{ с}$.

Зависимость скорости прихода от азимута. Из табл. 2 и рис. 2 видно, что скорость прихода v_{max} акустического сигнала в зависимости от станции изменялась в широких пределах (от 274 до 340 м/с). Эти изменения в основном вызваны влиянием тропосферно-стратосферного ветра. Скорость v_{max} связана со скоростью ветра w следующим образом [4]:

$$v_{\text{max}} = v + v_w \cos A,$$

где v — добавка к истинной скорости за счет влияния ветра, v — истинная скорость акустического сигнала, A_w , A , A_w и A — азимуты направления ветра и точки вспышки суперболида для каждой из станций. Для западного ветра $A_w = 270^\circ$, а для восточного — $A_w = 90^\circ$. Тогда

$$v_{\text{max}} = v + w \cos(270^\circ - A) = v - w \sin A, \quad (9)$$

$$v_{\text{max}} = v + w \cos(90^\circ - A) = v + w \sin A. \quad (10)$$

При западном ветре для станций, размещенных восточнее места взрыва метеороида, $A > 180^\circ$, $\sin A < 0$ и $v_{\text{max}} > v$, т.е. скорость прихода сигнала складывается с проекцией скорости ветра. При том же расположении и восточном ветре $v_{\text{max}} < v$.

При восточном ветре для станций, размещенных восточнее места свечения суперболида, $A < 180^\circ$, $\sin A > 0$ и $v_{\text{max}} > v$. При том же расположении и западном ветре $v_{\text{max}} < v$.

Из сравнения зависимостей (6) и (9), а также (7) и (10) можно сделать вывод, что скорректированное значение скорости прихода инфразвукового сигнала близко к 295 м/с, а средняя скорость ветра — для станций, расположенных южнее и севернее места взрыва метеороида, составляет около 16 и -4 м/с соответственно.

Корреляционные поля. Анализ рис. 4 и 8 показывает, что оценивание прихода по методике РМСС не является вполне удовлетворительным. Целесообразно использовать обе разновидности методики MatSeis, дающие сходные результаты. По этой причине оценки E по значениям T_1 не могут быть удовлетворительными. Оценки энергии метеороида по значениям T_2 и T_3 дают близкие результаты. Среднее значение $\bar{E} = 36.6 \pm 6.0 \text{ кт ТНТ}$, что несущественно (на 10 %) отли-

чается от данных независимого метода, применяемого НАСА (33 кт ТНТ).

Достаточно сильная статистическая связь между v_{\max} и v_{\min} (см. рис. 7) свидетельствует об отсутствии заметных дисперсионных искажений инфразвукового сигнала, приводящих к его уширению.

Значения амплитуд инфразвукового сигнала, оцениваемые по двум методикам, хорошо согласуются между собой.

Сильная статистическая связь между наблюдаемым и истинным значениями азимута источника инфразвука свидетельствует об адекватности методики оценки A_{ob} . Средняя погрешность в случае Индонезийского метеороида не превышала примерно 3° .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Как и следовало ожидать, время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось при увеличении горизонтального расстояния от эпицентра взрыва метеороида до станций по линейному закону. При этом средняя по всем трассам скорость прихода сигнала была близка к 297 м/с.

2. Средние значения скоростей прихода переднего и заднего фронтов инфразвукового сигнала составляли около 299 и 281 м/с соответственно и относительно слабо зависели от трассы распространения. По-видимому, зависимость скорости переднего фронта от расстояния описывается соотношением (3), которая имеет физическое объяснение.

3. Средняя длительность инфразвукового сигнала для различных трасс составляла 18.44 ± 9.34 мин. Дисперсионное уширение сигнала было несущественным на расстояниях 2...12 Мм. Вместе с тем наблюдалась тенденция к уменьшению длительности инфразвукового сигнала от 24...25 до 10...12 мин при увеличении r от 2 до 17.5 Мм.

4. Средние значения периодов инфразвукового сигнала, оцененные по различным методикам, составляли 10.6 ± 1.1 , 13.4 ± 1.2 и 14.1 ± 1.4 с. Первая из методик не является вполне удовлетворительной.

5. Среднее значение начальной кинетической энергии метеороида, полученное из инфразвуковых наблюдений периода колебаний, составляет 36.6 ± 6.0 кт ТНТ, что несущественно отличается от независимых данных НАСА (33 кт ТНТ).

6. Аппроксимация амплитуды инфразвукового сигнала от расстояния подтверждает, что на расстояниях 2...12 Мм имело место волновое распространение сигнала с затуханием. Коэффициент затухания был близок к 0.3 ± 0.1 Мм⁻¹.

7. Аппроксимация скорости прихода инфразвукового сигнала от синуса азимутального угла показала, что скорректированное значение скорости прихода сигнала составляло около 294 ± 2 м/с, а среднее значение тропосферно-стратосферного ветра для Южного и Северного полушарий было около 16 и -4 м/с соответственно.

8. Анализ корреляционных полей показал устойчивую статистическую связь между наблюдаемым и истинным значениями азимута источника инфразвука, между периодами колебаний, вычисленными по двум методикам в рамках технологии MatSeis, между амплитудами инфразвукового сигнала, оцененными по двум различным методикам (PMSS и MatSeis), а также между максимальным и минимальным значениями скорости прихода инфразвукового сигнала.

1. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Москва: ИХЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
2. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.
3. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доп. Нац. акад. наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.
4. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. **22**. № 1. С. 53—66.
5. Черногор Л. Ф., Ляшук А. И. Инфразвуковые наблюдения взрыва болида над Румынией 7 января 2015 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. **33**, № 6. С. 34—54.
6. Черногор Л. Ф., Ляшук А. И. Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. **33**, № 2. С. 60—72.
7. 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.
8. Cansi Y. An automatic seismic event processing for detection and location; the P.M.C.C. *Method. Geophys. Res. Lett.* 1995. **22**, N 9. P. 1021—1024, doi: 10.1029/95GL00468
9. Harris J. M., Young C. J. MatSeis: A seismic graphical user interface and toolbox for MATLAB. *Seismol. Res. Lett.* 1997. **68**. P. 307—308.
10. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. **342**. P. 1069—1073.
11. ReVelle D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. *Ann. Acad. Sci.* 1997. **822**. P. 284—302.
12. Silber E. A., Pichon A. L., Brown P. G. Infrasonic detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009. *Geophys. Res. Lett.* 2011. **38**. L12201, doi: 10.1029/2011GL047633
13. Silber E. A., Pichon A. L., Brown P. G. Infrasonic detection of a large bolides over South Sulawesi, Indonesia on October 8, 2009: Preliminary results. *Meteoroids: The smallest Solar system bodies. Proc. of the Meteoroids 2010 Conference held in Breckenridge, Colorado, USA, May 24—28, 2010*. P. 255—266.
14. Young C. J., Chael E. P., Merchant B. J. Version 1.7 of MatSeis and the GNEM R & E regional seismic analysis tools. *Proc. of the 24th Seismic Research Review*. 2002.

Статья поступила в редакцию 18.09.2017

Л. Ф. Черногор, М. Б. Шевелев

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна

ПАРАМЕТРИ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ, ЗГЕНЕРОВАНОГО
МЕТЕОРОЇДОМ НАД ІНДОНЕЗІЄЮ 8 ЖОВТНЯ 2009 р.

З використанням опублікованих результатів спостережень інфразвукового сигналу, який було зареєстровано 17 станціями, проведено статистичний аналіз основних па-

раметрів сигналу (часу затримки, швидкості приходу, тривалості, періоду коливань і амплітуди) в залежності від горизонтальної відстані між областю свічення Індонезійського суперболіда та місцезнаходженням інфразвукової станції. Наведено апроксимаційні залежності параметрів сигналу від відстані. Побудовано та проаналізовано кореляційні поля. Оцінено основні параметри метеороїда, скориговане значення швидкості приходу інфразвукового сигналу та середньої швидкості тропосферно-стратосферного вітру.

Ключові слова: метеороїд, інфразвуковий сигнал, основні параметри, апроксимаційні залежності.

L. F. Chernogor, M. B. Shevelev

V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

PARAMETERS OF THE INFRASOUND SIGNAL GENERATED BY THE PASSAGE
A METEOROID OVER INDONESIA ON OCTOBER 8, 2009

Based on infrasound signal observations made by 17 infrasound stations and published in the literature, the statistical analysis of the basic signal parameters (time delay, celerity, duration, oscillation period, and amplitude) has been performed as a function of the horizontal distance from the luminosity region of the Indonesian super-bolide to the place of a corresponding infrasound station. The approximating relations for the signal parameters as a function of range are presented. Correlation diagrams are constructed and analysed. The principal meteoroid parameters, the corrected infrasound wave celerity, and the mean troposphere-stratosphere wind speed are estimated.

Key words: meteoroid, infrasonic signal, main parameters, fitted dependences.