

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.01.053>

УДК 551.558, 551.596,
534.221

Л. Ф. ЧЕРНОГОР

PACS numbers: 94.20.-y,
96.30.Ys

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

АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

Предмет и цель работы: Исследуются параметры акустического сигнала (период, время запаздывания, скорость прихода, длительность, коэффициент затухания), сгенерированного при пролете и взрыве Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г., вместе с параметрами атмосферы.

Методы и методология: С использованием временных зависимостей уровня акустических сигналов, зарегистрированных на ряде инфразвуковых станций, получены основные параметры сигналов и проведено их сравнение с результатами моделирования.

Результаты: Показано, что время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось примерно по линейному закону при увеличении расстояния между акустическим источником и местом наблюдения. Средняя скорость прихода инфразвуковой волны была около 270 м/с. В спектре сигнала наблюдались составляющие с периодом (10 ÷ 100 с, преобладала гармоника с периодом около 30 с. Длительность инфразвукового сигнала определялась протяженностью его источника (50 ÷ 90 км) и дисперсионным расплыванием инфразвукового сигнала в атмосфере, зависящим от расстояния, проходимого волной. Общая длительность сигнала составляла 6 ÷ 30 мин при расстоянии 540 ÷ 5780 км. Найдены регрессионные зависимости времени запаздывания и удлинения акустического сигнала от пройденного расстояния. Характерная длина затухания инфразвука в зависимости от трассы составляла 1000 ÷ 3000 км. Показано, что эффект взрывной ударной волны был значительно сильнее эффекта баллистической волны почти на всех высотах. Заключение: Результаты оценок и моделирования хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Ключевые слова: кинетическая энергия метеороида, акустическая эффективность, средняя скорость ветра, длительность и время запаздывания акустического сигнала, параметры ударных волн, период колебаний

1. Введение

15 февраля 2013 г. в 03:20:22 UT (в 09:20:22 по местному времени) произошло редкое, но впервые в истории наблюдений хорошо задокументированное событие – падение и взрыв метеороида в районе г. Челябинска (Россия). Пролет Челябинского метеороида сопровождался целым комплексом физических процессов в атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле. Их описанию посвящен ряд работ [1–18].

Одним из важных физических эффектов, сопутствовавших полету и взрыву метеороида, был эффект генерации акустико-гравитационных волн, представляющих собой сочетание внутренних гравитационных волн и акустических волн (инфразвука). Проявления внутренних грави-

тационных волн на ионосферных высотах описаны в работах [13–18]. Результаты наблюдения инфразвукового излучения представлены в [19–21], а результаты теоретических оценок – в [10–12, 22–24].

По данным видеорегистраторов определены направление полета, угол наклона к горизонту (около 18°) и начальная скорость космического тела (18.5 ± 0.8 км/с). По энергиям вспышки, ударной волны, акустических и сейсмических колебаний была оценена энергия взрыва (около 90 кт ТНТ), начальная кинетическая энергия E_{k0} (около 440 кт ТНТ), масса тела (около 11 кт) и его диаметр (около 18 м) [1, 2, 4–12].

Для физики атмосферы представляет интерес более детальный анализ акустических эффектов, сопровождавших падение и взрыв Челябинского метеороида. Хорошо известно, что именно атмосфера оказывает решающее влияние на харак-

теристики инфразвуковых волн. Атмосфера формирует зоны слышимости и зоны молчания, которые определяются условием отражения инфразвуковых волн от стратосферы, термосферы и поверхности Земли.

Целью настоящей работы является теоретическая оценка параметров акустического сигнала (периода, длительности, затухания) при его распространении в атмосфере, сравнение с результатами наблюдений и получение регрессионных зависимостей для времени запаздывания и длительности акустического сигнала.

Акустико-гравитационные волны начинают генерироваться на высотах, где баллистическая ударная волна становится достаточно сильной. Скорее всего, эта высота близка к высоте, на которой начинается интенсивное свечение следа метеороида ($z \approx 60$ км). Интенсивность акустико-гравитационных волн значительно увеличивается после основного энерговыделения (взрыва метеороида).

Инфразвуковые волны, возникшие после пролета и взрыва Челябинского тела, были зарегистрированы инфразвуковыми станциями международной системы мониторинга (IMS) ядерных испытаний (созданной Подготовительной комиссией Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СВТО)) с энерговыделением не менее 1 кт ТНТ, а также станциями, расположенными в ряде геофизических обсерваторий. Ближайшая от места взрыва метеороида станция находится в г. Актобе (Актюбинск), Республика Казахстан (расстояние от источника инфразвука $R \approx 540$ км), наиболее удаленная станция – в Антарктиде ($R \approx 15000$ км).

Порожденные Челябинским метеороидом инфразвуковые волны, испытав многократные отражения, преломление и рассеяние в атмосфере и преодолев расстояние в сотни–тысячи километров были зарегистрированы чувствительными микробарографами. Амплитуда и спектр инфразвука несут в себе информацию об источнике волн и параметрах атмосферы [6, 25–33].

Исследования показали, что амплитуда инфразвука сильно зависит от скорости и направления ветра на стратосферных и термосферных высотах, от направления на станцию и метеоусловий на трассе распространения. Оказалось,

что амплитуда сигнала может изменяться на порядок и более при одной и той же мощности источника (см., например, [6]). Тем не менее именно измерения амплитуды инфразвука на станциях IMS положены в основу метода определения энергии взрывного источника. Для оценки кинетической энергии метеороидов используются измерения периода основного колебания инфразвука (см., например, [30, 33]). Корректно это можно делать на расстояниях в сотни километров в зоне прямой видимости либо в пределах одного цикла распространения при отражении инфразвука от стратосферы. Добавим, что протяженность одного цикла не превышает нескольких сотен километров, а дальность прямой видимости составляет около $560 \div 880$ км при высоте генерации инфразвука $23 \div 60$ км, что было характерно для Челябинского метеороида.

2. Результаты наблюдений

Приведем результаты наблюдения инфразвукового эффекта Челябинского космического тела на 9 станциях, изложенные в работах [19, 20]. Перечень инфразвуковых станций, а также время запаздывания волны Δt , скорость прихода волны v и длительность сигнала ΔT представлены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что скорость прихода акустического сигнала, вообще говоря, зависела от трассы и изменялась в пределах $222 \div 305$ м/с. Даже при одинаковой длине трассы (около 1500 км) $v \approx 222 \div 298$ м/с. Длительность сигнала имела тенденцию к увеличению при увеличении длины трассы.

Временные зависимости вариаций давления в инфразвуковой волне $\Delta p(t)$ показаны на рис. 1–3 (масштабы времени на рисунках различны). Сравнение рис. 1–3 показало, что максимальные значения $\Delta p \approx 5 \div 7$ Па имели место при $R_{\min} \approx 540$ км, а минимальные значения $\Delta p \approx 0.2 \div 0.3$ Па – при $R_{\max} \approx 5780$ км. Если бы потери энергии инфразвука отсутствовали, то при R_{\max} и цилиндрической расходимости фронта волны в приземном волноводе регистрировались бы значения $\Delta p \approx 1.5 \div 2.1$ Па. Уменьшение Δp примерно в $5 \div 10$ раз позволяет оценить коэффициент ослабления γ_a инфразвука из условия:

$$\exp(\gamma_a (R_{\max} - R_{\min})) \approx 5 \div 10.$$

Таблица 1. Параметры инфразвуковых станций и акустических сигналов

Название станции, (местоположение)	Координаты станции	R , км	Δt , мин	v , м/с	v' , м/с	ΔT , мин
IS31 (г. Актобе, Республика Казахстан)	50.4° с. ш., 58.0° в. д.	540	32	270	255	6 ÷ 7
Здание ИДГ РАН (г. Москва)	55.7° с. ш., 37.6° в. д.	1500	106	236	266	11
ТГУ (г. Томск)	56.5° с. ш., 84.9° в. д.	1500	87	287	257	11
ГФО ИДГ РАН "Михнево"	54.9° с. ш., 37.7° в. д.	1500	103	243	273	12
IS43 (г. Дубна)	56.7° с. ш., 37.3° в. д.	1513	103	245	275	12
IS46 (г. Залесово)	53.9° с. ш., 84.8° в. д.	1520	85	298	268	12
НПО "Тайфун" (г. Обнинск)	55.1° с. ш., 36.6° в. д.	1520	114	222	252	12
ГФО ИСЗФ РАН (г. Иркутск)	51.8° с. ш., 103.1° в. д.	2780	152	305	275	16 ÷ 17
IS44 (Камчатка)	51.1° с. ш., 158.8° в. д.	5780	322	299	269	29 ÷ 30

Из этого соотношения имеем $\gamma_a \approx (3.1 \div 4.4) \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$. Примерно такой же порядок имеют значения γ_a , полученные для Тунгусского тела и Витимского болида [35, 36]. Сравнения амплитуд $\Delta p = 5 \div 7 \text{ Па}$ и $\Delta p = 0.8 \div 1 \text{ Па}$ при $R_{\min} \approx 540 \text{ км}$ и $R \approx 1500 \text{ км}$ и цилиндрической расходимости волны приводит к значению $\gamma_a \approx (1.1 \div 1.8) \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$. Очевидно, что ослабление инфразвука существенно зависит от выбора трассы. Характерная длина затухания инфразвуковых волн в этих наблюдениях варьировалась в пределах $\gamma_a^{-1} \approx 1000 \div 3000 \text{ км}$. Это еще раз подтверждает, что амплитудные измерения, по крайней мере, при $R > 1000 \text{ км}$, не всегда пригодны для оценки параметров источника инфразвука.

Спектральный анализ, проведенный авторами [19, 21], показал, что в спектре вариаций $\Delta p(t)$ преобладают частоты инфразвука $f_a \approx 0.029 \div 0.039 \text{ Гц}$ (табл. 2). Табл. 2 построена по данным работ [19, 21], из нее видно, что частота f_a изменялась в пределах $0.029 \div 0.039 \text{ Гц}$ (с периодом $T \approx 25.64 \div 34.48 \text{ с}$).

Авторы работы [19] по периоду инфразвука, зарегистрированного на 8 станциях, с учетом эпицентральных расстояний, азимутов на источник и моделей атмосферы для разных сезонов года провели оценку энергии акустического источника. Результаты их оценки, а также оценки из работы [21] приведены в табл. 3.

По данным работы [19] среднее значение энергии метеороида равно 415 кт ТНТ при стандартном отклонении $\sigma = 97 \text{ кт ТНТ}$. С учетом данных, полученных на станции, расположенной в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики РАН (ГФО ИСЗФ РАН), имеем значение для начальной кинетической энергии тела $E_{k0} = (422.1 \pm 92.5) \text{ кт ТНТ}$. Для оценки доверительного интервала энергии, однако, следует использовать не σ , а среднеквадратическое отклонение оценки среднего значения \bar{E}_{k0} ,

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где n – число отсчетов. При $n = 9$ имеем $\tilde{\sigma} = 30.8 \text{ кт ТНТ}$. Тогда $E_{k0} = (422.1 \pm 30.8) \text{ кт ТНТ}$, а относительная погрешность $\Delta = \tilde{\sigma} / \bar{E}_{k0} \approx 7.3 \%$.

Если при обработке данных исключить "выбросы" в виде наибольшего (534 кт ТНТ) и наименьшего (221 кт ТНТ) значений энергий, то получим, что $E_{k0} = (434.9 \pm 18.5) \text{ кт ТНТ}$, а $\Delta = 4.2 \%$.

Для сравнения отметим, что по данным авторов [19] энергия метеороида, полученная по результатам измерений на 20 станциях IMS, была около 460 кт ТНТ. Для оценки энергии метеороида при $\bar{E}_{k0} > 40 \text{ кт ТНТ}$ использовалась следующая формула [30, 33]:

$$\lg(E_{k0}/2) = 4.14 \lg T - 3.61.$$

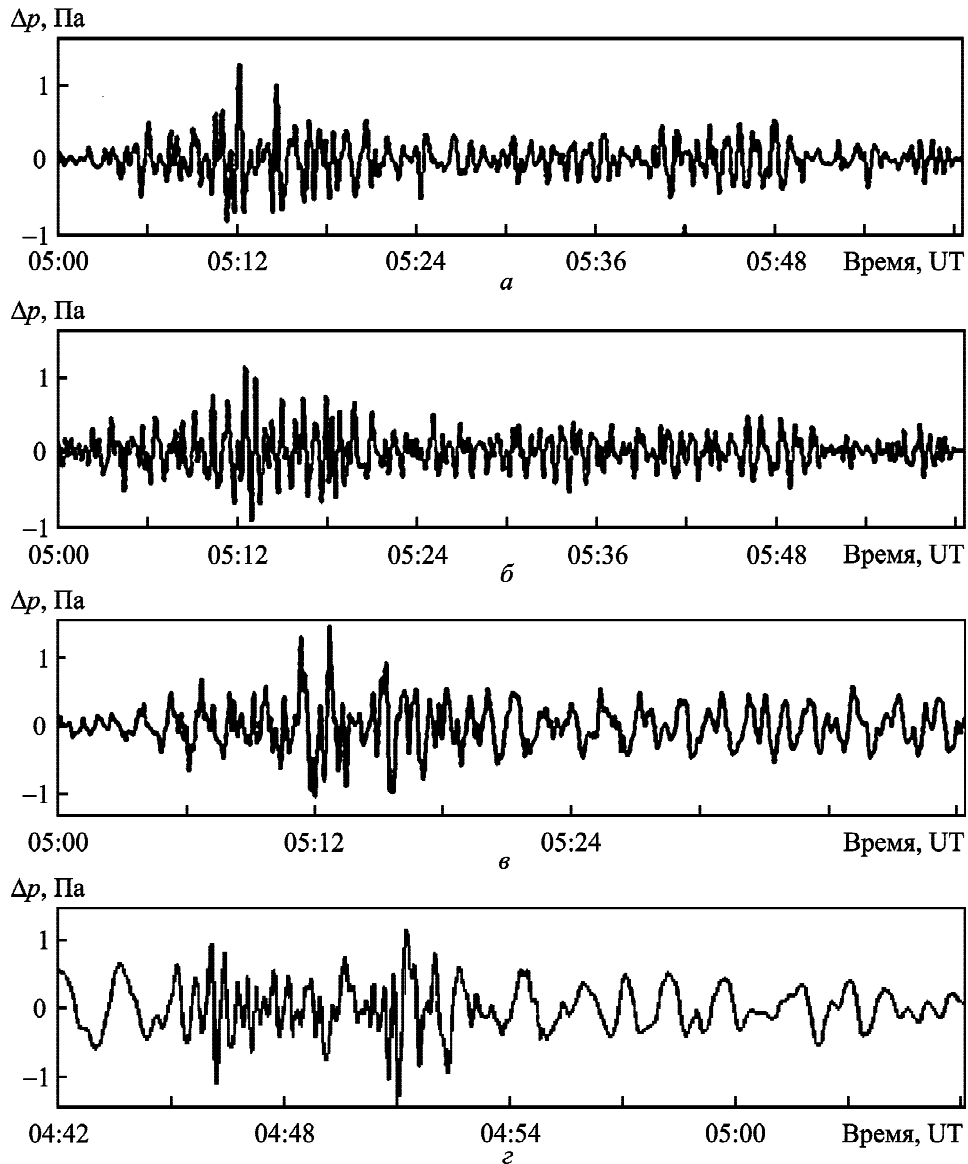


Рис. 1. Волновая форма инфразвукового сигнала от Челябинского метеороида, зарегистрированного в ИДГ РАН (г. Москва) (а); ГФО “Михнево” (б); инфразвуковой станцией IS43 (г. Дубна, Московская обл.) (в); инфразвуковой станцией IS46 (г. Залесово, Алтайский край) (г). (Данные из работы [19])

Энергии 460 кт ТНТ соответствует период колебаний $T \approx 27.7$ с.

3. Результаты расчетов

3.1. Оценка акустической эффективности

Из результатов наблюдений оценим долю кинетической энергии Челябинского метеороида, преобразуемую в энергию инфразвуковых волн. Для этого целесообразно воспользоваться результатами измерений, выполненных на станции IS31, ближайшей к месту взрыва метеороида [5].

При удалении от источника инфразвука на расстояние R энергия акустических волн (см., например, [34, 35])

$$E_a = \frac{2\pi R^2}{\rho_0 v_s} \overline{\Delta p^2} \Delta T,$$

где $\rho_0 \approx 1.3$ кг/м³ – плотность воздуха у поверхности Земли, $v_s \approx 330$ м/с – скорость инфразвуковых волн, $\overline{\Delta p^2}$ – среднее квадратическое значение амплитуды колебаний давления в инфразвуковой волне, ΔT – длительность основного цуга колебаний. Наблюдаемые другие цуги связаны, по-

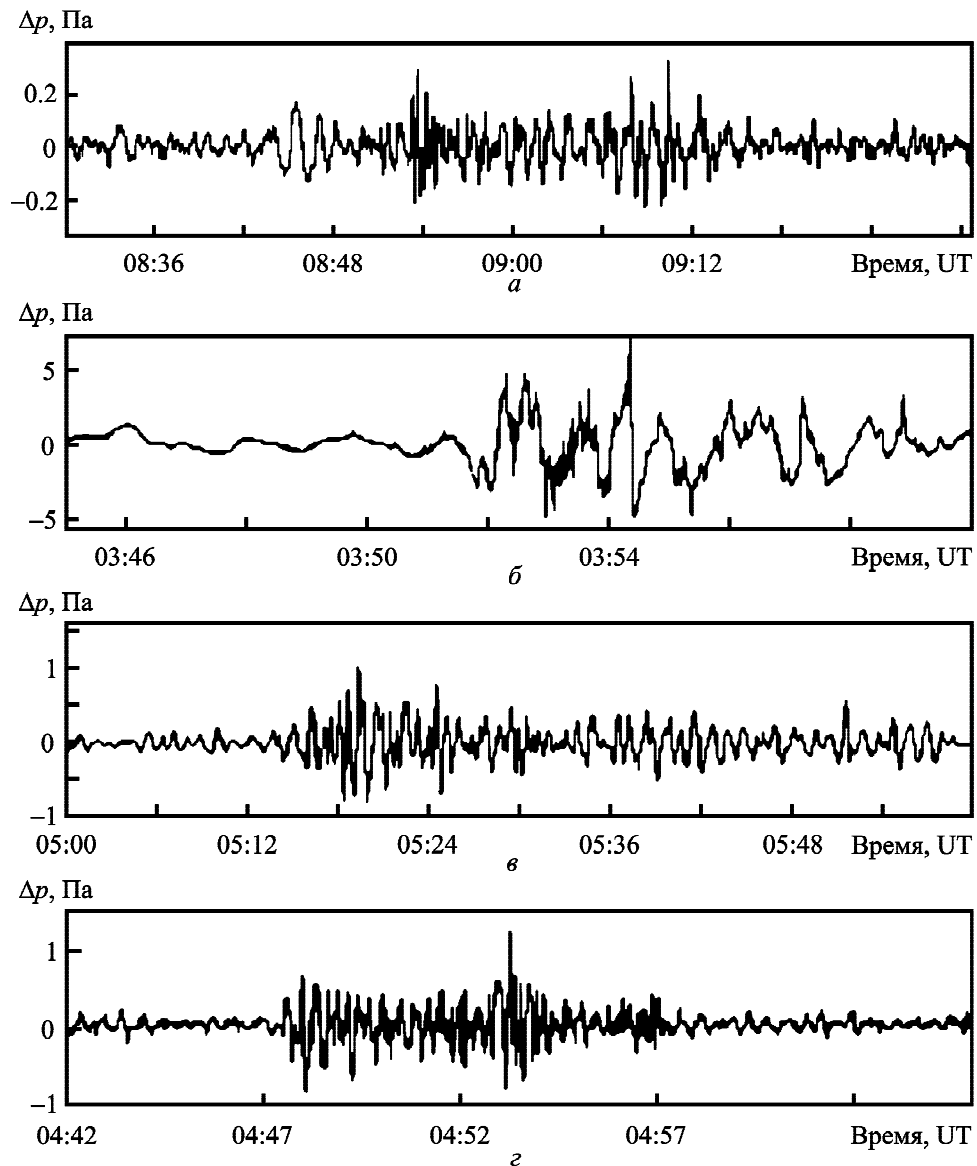


Рис. 2. Волновая форма инфразвукового сигнала от Челябинского метеороида, зарегистрированного инфразвуковыми станциями: IS44 (Камчатка) (а); IS31 (г. Актобе, Казахстан) (б); НПО «Тайфун» (г. Обнинск, Калужская обл.) (в); в Томском государственном университете (г. Томск) (г). (Данные из работы [19])

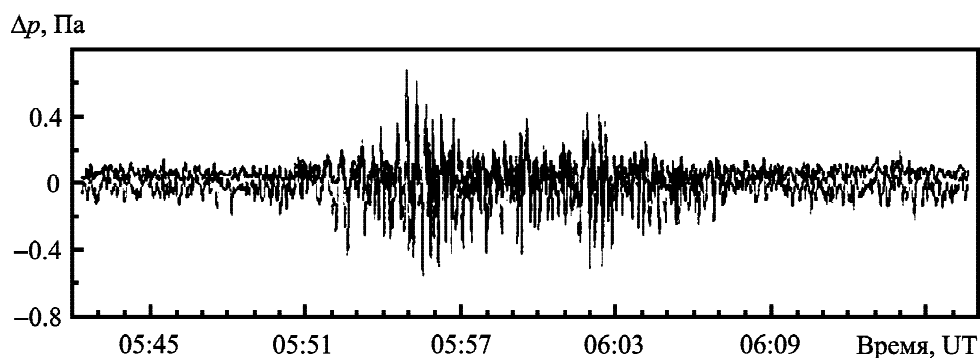


Рис. 3. Форма инфразвукового сигнала от Челябинского метеороида, зарегистрированного в ГФО ИСЗФ РАН (г. Иркутск). (Данные из работы [21])

Таблица 2. Основные параметры инфразвукового сигнала

Название станции	f_a , Гц	T , с
IS31	0.029	34.48
Здание ИДГ РАН	0.033	33.30
ТГУ	0.039	25.64
ГФО ИДГ РАН "Михнево"	0.0326	30.67
IS43	0.033	30.30
IS46	0.035	28.57
НПО "Тайфун"	0.032	31.25
ГФО ИСЗФ РАН	0.031	32.0
IS44	0.036	27.78

Таблица 3. Результаты оценки энергии Челябинского метеороида [19, 21]

Название станции	Энергия метеороида, кт ТНТ
IS31	534
Здание ИДГ РАН	445
ТГУ	328
ГФО ИДГ РАН "Михнево"	457
IS43	442
IS46	462
НПО "Тайфун"	474
ГФО ИСЗФ РАН	436
IS44	221

видимому, с распространением волн по другим траекториям.

Для станции IS31 $\overline{\Delta p^2} \approx 10 \text{ Па}^2$, $\Delta T \approx 6 \div 7$ мин, $R \approx 540$ км [19]. Тогда $E_a \approx 1.8 \cdot 10^{13}$ Дж. При начальной кинетической энергии $E_{k0} \approx 1.88 \cdot 10^{15}$ Дж имеем

$$\eta_a = \frac{E_a}{E_{k0}} \approx 1 \text{ \%}.$$

Из этой оценки следует, что при падении крупных космических тел в энергию инфразвука преобразуется около 1 % их кинетической энергии [32]. Значения η_a для более мелких метеороидов метрового размера оценивались в ряде работ [36–39]. Оказалось, что для таких тел $\eta_a \approx 0.1 \div 1 \text{ \%}$. Таким образом, акустическая эффективность существенно зависит от E_{k0} .

Добавим, что учет ослабления инфразвуковой волны (см. раздел 2) приводит к увеличению значения η_a примерно в 1.1 раза.

3.2. Оценка средней скорости ветра

По данным из табл. 1 можно вычислить среднюю скорость \bar{v} прихода инфразвуковых волн и среднеквадратическое отклонение среднего значения $\bar{\sigma}_v$. Оказалось, что $\bar{v} \approx (267.2 \pm 10.8) \text{ м/с}$. Если исключить из данных наименьшую скорость 222 м/с, то $\bar{v} \approx (272.9 \pm 10.0) \text{ м/с}$. Видно, что относительная погрешность не превышает 4 %.

При более точных расчетах необходим учет влияния ветра на скорость прихода инфразвуковых волн. В зимнее время на евро-азиатском континенте преобладает западный ветер. Его скорость можно оценить из данных, приведенных в табл. 1. Для станций, расположенных западнее Челябинска (здание Института динамики геосфер РАН "Михнево", IS43, Научно-производственное объединение "Тайфун"), среднее значение скорости прихода инфразвука $\bar{v}_e \approx 237 \text{ м/с}$. Для станций, расположенных восточнее (Томский государственный университет, IS46, Геофизическая обсерватория Института солнечно-земной физики, IS44), скорость $\bar{v}_w \approx 297 \text{ м/с}$. Тогда средняя скорость западного ветра на указанных трассах $w = (\bar{v}_w - \bar{v}_e)/2 \approx 30 \text{ м/с}$. Примерно такое же значение скорости ветра получено автором из измерений скорости прихода инфразвуковых волн на украинских станциях, расположенных западнее места взрыва Челябинского метеороида. Добавим, что найденная оценка скорости ветра близка к данным метеорологических наблюдений, приведенных в работе [19]. Скорректированное значение скорости прихода инфразвука

$$v' = \bar{v} + w \cos \beta,$$

где β – угол между направлениями запад – восток и Челябинск – инфразвуковая станция. Тогда для станций, расположенных западнее Челябинска, $v' \approx \bar{v} + w$, для станций, расположенных восточнее, $v' \approx \bar{v} - w$. Значения v' также приведены в табл. 1. Среднее по всем станциям значение $\bar{v}' \approx 266 \text{ м/с}$, а $\bar{\sigma}_v \approx 2.9 \text{ м/с}$. При этом относительная погрешность оценки \bar{v}' составляет около 1.1 %.

3.3. Длительность акустического сигнала

Длительность акустического сигнала ΔT определяется дисперсионным расплыванием сигнала, за счет которого длительность увеличивается на ΔT_2 , и продолжительностью акустического излучения ΔT_1 ,

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta L}{\bar{v}} = \frac{v_0}{\bar{v}} \tau_{\text{eff}},$$

где ΔL и v_0 – эффективная длина излучающего следа и скорость метеороида, \bar{v} – скорость прихода акустического сигнала, τ_{eff} – эффективная длительность свечения метеороида. Исходя из данных наблюдений, положим, что $\tau_{\text{eff}} \approx 4.1 \div 4.3$ с, $v_0 \approx 18$ км/с, $\bar{v} \approx (266 \pm 3)$ м/с. Тогда $\Delta L \approx 74 \div 77$ км, а $\Delta T_1 \approx 4.6 \div 4.9$ мин.

Значение ΔT_2 определяется разностью Δv скоростей прихода переднего и заднего фронтов сигнала. Из наблюдений следует, что $\bar{v} \approx 266$ м/с, а Δv при $R \leq 6000$ км составляет около 19 м/с [40]. Тогда при пройденном волной расстоянии R имеем:

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta v}{\bar{v}(\bar{v} + \Delta v)} R = a_{TR} R,$$

$$a_{TR} = \frac{\Delta v}{\bar{v}(\bar{v} + \Delta v)}.$$

Результаты расчета ΔT_2 , ΔT и экспериментально наблюдаемые значения ΔT_{exp} , взятые из табл. 1, приведены в табл. 4. Из табл. 4 видно, что наблюдательные данные хорошо согласуются с результатами оценок.

По экспериментальным данным ряда инфразвуковых станций евро-азиатского региона определены следующие регрессионные зависимости:

$$\Delta t = \Delta t_1 + a_{tR} R,$$

$$\Delta T = \Delta T_1 + a_{TR} R,$$

где $\Delta t_1 \approx (1.3 \pm 0.1)$ мин, $a_{tR} \approx (6.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$ мин/км, $\Delta T_1 \approx (4.6 \pm 0.2)$ мин, $a_{TR} \approx (4.25 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$ мин/км. Величина Δt_1 определяется выражением $\Delta t_1 = z_e/v$. При $z_e \approx 23$ км и $v = (266 \pm 3)$ м/с имеем расчетное значение $\Delta t_1 \approx 1.43 \div 1.46$ мин. Величина

Таблица 4. Зависимость параметров акустического сигнала от расстояния, пройденного волной

R , км	540	1500	2780	5780
ΔT_1 , мин	4.6 ÷ 4.9	4.6 ÷ 4.9	4.6 ÷ 4.9	4.6 ÷ 4.9
ΔT_2 , мин	2.2	6.4	11.8	24.7
ΔT , мин	6.8 ÷ 7.1	11 ÷ 11.3	16.4 ÷ 16.7	29.3 ÷ 29.6
ΔT_{exp} , мин	6 ÷ 7	11 ÷ 12	16 ÷ 17	29 ÷ 30

a_{tR} определяется формулой $a_{tR} = v^{-1}$. При той же скорости v получаем расчетное значение $a_{tR} \approx 5.89 \cdot 10^{-2} \div 6.33 \cdot 10^{-2}$ мин/км (среднее значение – $6.11 \cdot 10^{-2}$ мин/км). Коэффициент $a_{TR} = \Delta v/(v(v + \Delta v))$. При той же скорости v и $\Delta v \approx 19$ м/с имеем расчетное значение $a_{TR} \approx (4.16 \pm 0.04) \cdot 10^{-3}$ мин/км.

Видно, что определенные из регрессии и вычисленные значения Δt_1 , ΔT_1 , a_{tR} и a_{TR} близки между собой.

3.4. Параметры ударных волн

В процессе полета Челябинского метеороида на высотах $60 \div 25$ км генерировалась баллистическая ударная волна, а на высотах $25 \div 20$ км – взрывная ударная волна. Баллистическая волна относится к цилиндрическим, а взрывная – к сферическим волнам. Разумеется, переход от баллистической к взрывной волне происходил постепенно.

Характерный радиус баллистической ударной волны (см., например, [30])

$$R_0 = \sqrt{F/p} = Md,$$

где F – погонная плотность энергии, теряемая метеороидом при его движении до взрыва, p – давление атмосферного газа, $M = v/v_s$ – число Маха, v – скорость метеороида, d – его диаметр.

Погонная плотность энергии равна силе сопротивления воздуха

$$F = \frac{C_d}{2} \rho v^2 S.$$

Здесь C_d – коэффициент динамического сопротивления, ρ – объемная плотность атмосферного газа, $S \approx \pi d^2/4$ – мидель метеороида.

До достижения высоты примерно 30 км, на которой произошло существенное разрушение метеороида, значения d , S и v близки к первоначальным значениям d_0 , S_0 и v_0 соответственно. При $M \approx 55$ и $d \approx 18$ м имеем $R_0 \approx 1$ км.

Фундаментальный период баллистической ударной волны (см., например, [30])

$$T_{ob} = \frac{2.81 R_0}{v_s}. \quad (1)$$

При $v_s \approx 330$ м/с имеем $T_0 \approx 8.5$ с. С ростом расстояния R от источника вследствие дисперсии период постепенно увеличивается по следующему закону (см., например, [30]):

$$T_b = 0.562 T_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{1/4}. \quad (2)$$

Результаты оценки $T(R)$ приведены в табл. 5.

Относительное давление во фронте баллистической ударной волны дается следующим выражением (см., например, [30]):

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{0.4503}{\left(1 + 4.803 R^2/R_0^2\right)^{3/8} - 1}, \quad (3)$$

где $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты. При $R^2 \gg R_0^2$ это выражение упрощается и $\Delta p/p \approx 0.3(R_0/R)^{3/4}$. Результаты оценок $\Delta p/p$ также приведены в табл. 5. Оценки $\Delta p/p$ справедливы лишь в горизонтальном направлении по отношению к источнику ударной волны. В вертикальном направлении необходимо учитывать изменение p и ρ с высотой. Выше источника значения $\Delta p/p$ увеличиваются с ростом R по экспоненциальному закону с масштабом $2H \approx 15$ км (H – приведенная высота атмосферы). Ниже источника значения $\Delta p/p$, напротив, уменьшаются по тому же закону. Поэтому у поверхности земли значения $\Delta p/p$ будут по крайней мере на порядок меньше значений, приведенных в табл. 5.

В диапазоне высот $30 \div 25$ км из-за прогрессивного дробления метеороида произошло постепенное увеличение d и S и уменьшение v [10–12]. Это привело к увеличению R_0 от 1 до $7 \div 8$ км. Периоды T_{0b} и T_b увеличились примерно во столько же раз.

В диапазоне высот $25 \div 20$ км (средняя высота взрыва $z_e \approx 23$ км) была сгенерирована взрывная ударная волна. Ее характерный радиус (см., например, [11, 12])

$$R_e = \sqrt[3]{\frac{3E_e}{4\pi p(z_e)}},$$

где $E_e = \eta_e E_{k0}$ – энергия взрыва, $\eta_e \approx 0.2$ [3]. При $p(z_e) \approx 4.7 \cdot 10^3$ Па имеем $R_e \approx 2.7$ км. Тогда

в соответствии с соотношением (1) период $T_{0e} \approx 23$ с. За счет дисперсии период увеличивался по закону (2). Результаты оценки T_e также приведены в табл. 5.

Спектральный анализ $\Delta p(t)$ показал, что в инфразвуковом сигнале от Челябинского метеороида действительно преобладали колебания с периодом $10 \div 100$ с.

Для сферической волны при $R > R_0$

$$\Delta p = \Delta p(R_0) \frac{R_0}{R} = p(z_e) \frac{R_0}{R},$$

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{p(z_e)}{p(z)} \frac{R_0}{R} = \frac{R_0}{R} e^{(z-z_e)/2H}.$$

В эпицентре взрыва $z = 0$ и $\Delta p \approx 2.5$ кПа. При $R \approx 100$ км имеем $\Delta p \approx 0.6$ кПа. Примерно на таких расстояниях еще наблюдались разрушения в Челябинской области, вызванные ударной волной [1, 2, 4–9].

Взрыв имел место в диапазоне высот $\Delta z_e \approx 5$ км [3]. При этом длина траектории $l = \Delta z_e / \sin \alpha \approx 15$ км. Энергия, затраченная на генерацию баллистической ударной волны в диапазоне высот Δz_e ,

$$E_b = \frac{C_d}{2} \rho v_0^2 S l = \frac{C_d}{8} \pi \rho v^2 d^2 l.$$

В то же время энергия, вызвавшая генерацию взрывной волны,

$$E_e = \eta_e E_{k0} = \frac{\pi}{12} \eta_e \rho_b d_0^3 v_0^2,$$

где $\rho_b \approx 3.6 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность вещества метеороида. Тогда

$$\eta = \frac{E_b}{E_e} = \frac{3 C_d \rho}{2 \eta_e \rho_b} \frac{l}{d_0} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2.$$

При $z \approx 60 \div 30$ км $d \approx d_0$, $v \approx v_0$,

Таблица 5. Зависимость периода волнового возмущения для баллистической T_b и взрывной T_e волн, а также относительного давления, вызванного баллистической волной, от расстояния

R , км	30	50	100	500	1000	1500	3000	5000
T_b , с	11.2	12.8	15.2	22.7	27.0	29.8	35.5	40.4
$\Delta p/p$	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
T_e , с	30.2	34.6	41.0	61.3	72.9	80.5	95.9	109.0

$$\eta \approx \frac{3 C_d \rho l}{2 \eta_e \rho_b d_0} \approx 1.7 \cdot 10^{-4} \div 1.7 \cdot 10^{-2}.$$

При $\eta \ll 1$ вклад в генерацию ударно-волнового возмущения баллистической волны значительно меньше, чем взрывной волны. По данным [10–12], вблизи $z \approx 25$ км $d/d_0 \approx 7$, $v/v_0 \approx 0.5$, $\rho \approx 4.6 \cdot 10^{-2}$ кг/м³, а $\eta \approx 1$. Здесь вклад обеих волн соизмерим. При $z \approx 27$ км имеем $\eta \approx 0.3$.

Таким образом, в акустическом эффекте Челябинского метеороида основную роль играла ударная волна, сгенерированная в диапазоне высот $27 \div 20$ км, в энергию которой перешло около 20 % начальной кинетической энергии космического тела.

В данных наблюдений вклады баллистической и взрывной волн можно различить по времени запаздывания. Инфразвуковой сигнал от взрывной волны проходит меньшее расстояние и регистрируется раньше.

4. Обсуждение

Полет и взрыв Челябинского метеороида сопровождалась генерацией интенсивных инфразвуковых колебаний в достаточно широком диапазоне частот. При этом в спектре колебаний преобладала составляющая с частотой (32.2 ± 0.7) мГц, которой соответствовал период колебаний (30.09 ± 0.44) с. Значение этого периода определялось колебанием области взрыва метеороида.

Время запаздывания акустического сигнала определялось двумя составляющими: временем распространения акустического сигнала от высоты взрыва до поверхности Земли и временем распространения вдоль земной поверхности (вдоль волновода, образованного стратосферой и поверхностью Земли или термосферой и поверхностью Земли). О распространении вдоль земной поверхности можно говорить потому, что высота волновода на достаточно больших расстояниях от источника инфразвука значительно меньше этого расстояния. Первое время зависело от высоты взрыва, второе – от пройденного инфразвуком расстояния от эпицентра взрыва до места регистрации. Из данных наблюдений получена следующая зависимость времени запаздывания акустического сигнала от расстояния:

$$\Delta t = (1.3 \pm 0.1) + (6.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-2} R, \quad (4)$$

где Δt измеряется в минутах, а R – в километрах. Теоретически рассчитанная зависимость имеет вид:

$$\Delta t = (1.44 \pm 0.05) + (6.11 \pm 0.22) \cdot 10^{-2} R. \quad (5)$$

Видно, что зависимости (4) и (5) достаточно близки.

Длительность акустического сигнала зависела от продолжительности акустического излучения (длины траектории космического тела) и его дисперсионного удлинения в процессе распространения. Продолжительность излучения определялась эффективной длиной следа, равной $74 \div 83$ км, и составляла (4.9 ± 0.5) мин. Дисперсионное удлинение зависело от диспергирующих свойств атмосферы, т. е. от зависимости скорости спектральных составляющих от их периода. Соответствующий коэффициент, определенный из результатов наблюдений, составил $a_{TR} \approx (4.25 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$ мин/км. Эмпирическая зависимость имеет вид:

$$\Delta T = (4.6 \pm 0.2) + (4.25 \pm 0.02) \cdot 10^{-3} R, \quad (6)$$

где ΔT измеряется в минутах, а R – в километрах.

Расчетная зависимость представляется в следующем виде:

$$\Delta T = (4.75 \pm 0.15) + (4.16 \pm 0.04) \cdot 10^{-3} R. \quad (7)$$

Сравнивая соотношения (6) и (7), можно видеть, что они достаточно близки.

Заметим, что значение коэффициента $a_{TR} \approx (4.25 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$ мин/км справедливо лишь при $R \leq 6000$ км. При дальнейшем увеличении расстояния R в результате фильтрации спектр инфразвукового сигнала сужается, значение Δv уменьшается, как показали наблюдения на инфразвуковой станции “Антарктида” ($R \approx 15000$ км), до 8 м/с, а $a_{TR} \approx 1.6 \cdot 10^{-3}$ мин/км. Такое же значение справедливо и для акустического сигнала, принятого в Антарктиде, но пришедшего по длинной дуге, т. е. когда $R \approx 25000$ км.

В работе получена также оценка коэффициента ослабления акустического сигнала, который оказался порядка 10^{-4} км⁻¹. Примерно такие же значения этого коэффициента получены при моделировании акустических эффектов Тунгусского тела и Витимского болида [34, 35].

Соответствие результатов расчетов временных параметров акустического сигнала результатам наблюдений свидетельствует об адекватности модельных представлений о генерации и распространении в атмосфере инфразвука, порожденного полетом и взрывом Челябинского метеороида. В то же время расчеты $\Delta p/p$ по соотношению (3) дают завышенные на порядок значения для поверхности Земли. Здесь в соответствии с расчетами $\Delta p/p \approx 5 \cdot 10^{-5}$, а $\Delta p = 5$ Па при $R \approx 5000$ км. Как показали наблюдения, при $R \approx 5780$ км $\Delta p \approx 0.2 \div 0.3$ Па. Различие в результатах оценок и наблюдений частично связано с тем, что формула (3) не учитывает затухание волны. При $\gamma_a^{-1} \approx 3000$ км расчетное значение Δp уменьшается примерно в 7 раз. Следовательно, соотношение (3) имеет ограниченное применение.

Таким образом, акустические эффекты метеороидов существенно отличаются от акустических эффектов атмосферных взрывов. При взрывах начальная длительность акустических сигналов, зависящая от мощности взрыва, значительно меньше длительности акустических сигналов от космических тел.

5. Выводы

1. Пролет и взрыв Челябинского метеороида сопровождался генерацией интенсивного инфразвука. Время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось примерно по линейному закону при увеличении расстояния между акустическим источником и местом наблюдения. Средняя скорость прихода инфразвуковой волны была около 270 м/с.

2. В спектре инфразвукового сигнала преобладала гармоника с периодом около 30 с. Это соответствовало начальной энергии метеороида (434.9 ± 18.5) кт ТНТ. В целом же, в спектре наблюдались составляющие с периодом $10 \div 100$ с, что согласуется с оценками.

3. При увеличении расстояния между местом генерации инфразвука и местом его регистрации от 540 до 5780 км амплитуда сигнала уменьшалась от $5 \div 7$ до $0.2 \div 0.3$ Па. Характерная длина ослабления инфразвука в зависимости от трассы составляла около $1000 \div 3000$ км.

4. Длительность инфразвукового сигнала определялась протяженностью его источника (около $50 \div 90$ км) и дисперсионным расплыванием ин-

фразвукового сигнала в атмосфере, зависящим от расстояния, проходимого волной. Общая длительность сигнала составляла около $6 \div 30$ мин при $R \approx 540 \div 5780$ км. Результаты оценок хорошо согласуются с результатами наблюдений.

5. Найдены регрессионные зависимости времени запаздывания и удлинения акустического сигнала от пройденного расстояния.

6. Акустический эффект взрывной ударной волны был значительно сильнее эффекта баллистической ударной волны почти на всех высотах.

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., Леценко 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. – М.: ФГБУ "ИПГ", 2013. – 37 с.
3. Grigoryan S. S., Ibdov F. S., and Ibdov 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., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рышлова 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.* – М.: 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., 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. 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., Emyanenko 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. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization // *Science*. [Электронный ресурс]. – 2013. – vol. 342. Режим доступа: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1
 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., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита “Челябинск” // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 231–243.
 14. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // *Радиофизика и электроника*. – 2013. – Т. 4 (18), № 3. – С. 47–54.
 15. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита // *Космічна наука і технологія*. – 2013. – Т. 19, № 6. – С. 38–46.
 16. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2014. – Т. 30, № 3. – С. 27–42.
 17. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2014. – Т. 54, № 5. – С. 658–669.
 18. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2015. – Т. 55, № 3. – С. 370–385.
 19. 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*. – М.: Геос, 2013. – Вып. 4. – С. 21–32.
 20. Гохберг М. Б., Ольшанская Е. В., Стеблов Г. М., Шалимов С. Л. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS // *Доклады Академии наук*. – 2013. – Т. 452, № 2. – С. 208–212.
 21. Сорокин А. Г. Об инфразвуковом излучении Челябинского метеороида // *Труды XXIV Всероссийской научной конференции. Распространение радиоволн (РРВ-24)*, 29 июня – 5 июля 2014 г. / Под ред. В. И. Куркина. – Иркутск. – 2014. – Т. III. – С. 242–245.
 22. 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.
 23. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2013. – № 10. – С. 97–104.
 24. Chernogor L. F. Acoustic effects of Chelyabinsk meteoroid // *15th Ukrainian conference on space research*, 24–28 Aug. 2015: Abstracts. – Odesa, Ukraine. – 2015. – P. 149.
 25. Reed J. Airblast overpressure decay at long ranges // *J. Geophys. Res.* – 1972. – Vol. 77. – P. 1623–1629. DOI: 10.1029/JC077i009p01623
 26. ReVelle D. O. On meteor-generated infrasound // *J. Geophys. Res.* – 1976. – Vol. 81. – P. 1217–1231. DOI: 10.1029/JA081i007p01217
 27. 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
 28. Stevens J. L., Adams D. A., Baker G. E., Xu H., Murphy J. R., Divnov I., Bourchik V. N. and Kitov I. Infrasound scaling and attenuation relations from Soviet explosion data and instrument design criteria from experiments and simulations // *21th Annual Seismic Research Symposium on monitoring a CTBT: Proc. Symp.* – Las Vegas, Nevada, USA – 1999. – P. 185–194.
 29. Silber E. A., ReVelle D. O., Brown P. G., and Edwards W. N. An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements // *J. Geophys. Res.* – 2009. – Vol. 114, Is. E8. – id. E08006. DOI:10.1029/2009JE003334
 30. Edwards W. N. Meteor Generated Infrasound: Theory and Observation / *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies / A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne, eds.* – Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. – P. 361–414.
 31. Silber E. A., Le Pichon A., and Brown P. G. Infrasound detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009 // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – Vol. 38, Is. 12. – id L12201. DOI: 10.1029/2011GL047633

32. *Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N., and Silber E. A.* Infrasonic production by bolides: A global statistical study // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2012. – Vol. 80. – P. 208–229. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.01.018
33. *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
34. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 556 с.
35. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2011. – Т. 51, № 1. – С. 119–132.
36. *Brown P., Hildebrand A. R., Green D. W. E., Pagé D., Jacobs C., Revelle D., Tagliaferri E., Wacker J., and Wetmiller B.* The fall of the St-Robert meteorite // *Meteorit. Planet. Sci.* – 1996. – Vol. 31, Is. 4. – P. 502–517. DOI: 10.1111/j.1945-5100.1996.tb02092.x
37. *Brown P., ReVelle D. O., Tagliaferri E., and Hildebrand A. R.* An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records // *Meteorit. Planet. Sci.* – 2002. – Vol. 37, Is. 5. – P. 661–675. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2002.tb00846.x
38. *Brown P. G., Whitaker R. W., ReVelle D. O., and Tagliaferri E.* Multi-station infrasonic observations of two large bolides: signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – Vol. 29, Is. 13. – P. 14-1–14-4. DOI: 10.1029/2001GL013778
39. *Borovička J., Weber H. W., Jopek T., Jakeš P., Randa Z., Brown P. G., ReVelle D. O., Kalenda P., Schultz L., Kučera J., Haloda J., Tjycová P., Frýda J., and Brandstätter F.* The Morávka meteorite fall: 3. Meteoroid initial size, history, structure and composition // *Meteorit. Planet. Sci.* – 2003. – Vol. 38, Is. 7. – P. 1005–1021. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00295.x
40. Пасечник И. П. Наука доказала: ядерные взрывы можно обнаружить, где бы они ни производились // *Природа.* – 1962. – № 7. – С. 3–12.
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. (*Theoretical issue*).
5. ANTIPIN, N. A., ed. 2014. *The Chelyabinsk Meteorite – one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference.* Chelyabinsk, Russia: Kamennyi pojas 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., 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., 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., 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., 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.,

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).

- LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHEK-KO, 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
10. CHERNOGOR, L. F. and ROZUMENKO, V. T., 2013. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Tech.* 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. and GARMASH, K. P., 2013. Disturbances in Geospace Associated with the Chelyabinsk Meteorite Passage. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 3, pp. 231–243 (in Russian).
 14. CHERNOGOR, L. F., 2013. Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite. *Radiofizika i elektronika*. vol. 4 (18), no. 3, pp. 47–54 (in Russian).
 15. CHERNOGOR, L. F., MILOVANOV, YU. B., FEDORENKO, V. N. and TSYMBAL, A. M., 2013. Satellite observations of the ionospheric disturbances followed by the fall of Chelyabinsk meteorite. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. vol. 19, no. 6, pp. 38–46 (in Russian).
 16. CHERNOGOR, L. F. and BARABASH, V. V., 2014. Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. vol. 30, no. 3, pp. 126–136. DOI: 10.3103/S0884591314030039
 17. CHERNOGOR, L. F., 2014. Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagn. Aeron.* vol. 54, no. 5, pp. 613–624. DOI: 10.1134/S001679321405003X
 18. CHERNOGOR, L. F., 2015. Ionospheric effects of Chelyabinsk meteoroid. *Geomagn. Aeron.* vol. 55, no. 3, pp. 353–368. DOI: 10.1134/S0016793215030044
 19. 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. 21–32 (in Russian).
 20. GOKHBERG, M. B., OL'SHANSKAYA, E. V., STEBLOV, G. M. and SHALIMOV, S. L., 2014. The Chelyabinsk meteorite: Ionospheric response based on GPS measurements. *Doklady Earth Sciences*. vol. 452, is. 1, pp. 948–952. DOI: 10.1134/S1028334X13090109
 21. SOROKIN, A. G., 2014. On infrasonic radiation of Chelyabinsk meteoroid. In: V. I. KURKIN, ed. *Radio Waves Propagation: Proceedings of 24th All-Russian Scientific Conference*. Irkutsk, Russia, 29 Jun – 5 Jul 2014. pp. 242–245 (in Russian).
 22. CHERNOGOR, L. F., 2014. Main effects of Chelyabinsk meteorite falling: physics and mathematics calculation results. In: ANTIPIIN, 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).
 23. CHERNOGOR, L. F., 2013. Physical effects caused by flight of Chelyabinsk meteoroid. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini*. no. 10, pp. 97–104 (in Russian).
 24. CHERNOGOR, L. F., 2015. Acoustic effects of Chelyabinsk meteoroid. In: *15th Ukrainian conference on space research Abstracts*. 24–28 Aug. 2015, Odesa, Ukraine. p. 149.
 25. REED, J., 1972. Airblast overpressure decay at long ranges. *J. Geophys. Res.* vol. 77, pp. 1623–1629. DOI: 10.1029/JC077i009p01623
 26. REVELLE, D. O., 1976. On meteor-generated infrasound. *J. Geophys. Res.* vol. 81, pp. 1217–1231. DOI: 10.1029/JA081i007p01217
 27. 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
 28. STEVENS, J. L., ADAMS, D. A., BAKER, G. E., XU, H., MURPHY, J. R., DIVNOV, I., BOURCHIK, V. N. and KITOV, I., 1999. Infrasound scaling and attenuation relations from Soviet explosion data and instrument design criteria from experiments and simulations. In: *21th Annual Seismic Research Symposium on monitoring a CTBT Proceedings*. Las Vegas, Nevada. pp. 185–194.
 29. SILBER, E. A., REVELLE, D. O., BROWN, P. G. and EDWARDS, W. N., 2009. An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements. *J. Geophys. Res.* vol. 114, is. E8, id. E08006. DOI:10.1029/2009JE003334
 30. EDWARDS, W. N., 2010. Meteor Generated Infrasound: Theory and Observation. In: A. LE PICHON, E. BLANC, A. HAUCHECORNE, eds. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, pp. 361–414.
 31. SILBER, E. A., LE PICHON, A. and BROWN, P. G., 2011. Infrasound detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009. *Geophys. Res. Lett.* vol. 38, is. 12, id L12201. DOI: 10.1029/2011GL047633
 32. ENS, T. A., BROWN, P. G., EDWARDS, W. N. and SILBER, E. A., 2012. Infrasound production by bolides: A global statistical study. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* vol. 80, pp. 208–229. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.01.018
 33. 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
 34. CHERNOGOR, L. F., 2012. *Physics and ecology of the catastrophes*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
 35. CHERNOGOR, L. F., 2011. Oscillations of the geomagnetic field caused by the flight of Vitim bolide on September 24, 2002. *Geomagn. Aeron.* vol. 51, no. 1, pp. 116–130. DOI: 10.1134/S0016793211010038

36. BROWN, P., HILDEBRAND, A. R., GREEN, D. W. E., PAGÉ, D., JACOBS, C., REVELLE, D., TAGLIAFERRI, E., WACKER, J. and WETMILLER, B., 1996. The Fall of the St-Robert Meteorit. *Planet. Sci.* vol. 31, is. 4, pp. 502–517. DOI: 10.1111/j.1945-5100.1996.tb02092.x
37. BROWN, P., REVELLE, D. O., TAGLIAFERRI, E. and HILDEBRAND, A. R., 2002. An Entry Model for the Tagish Lake Fireball Using Seismic, Satellite and Infrasound Records. *Meteorit. Planet. Sci.* vol. 37, is. 5, pp. 661–675. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2002.tb00846.x
38. BROWN, P. G., WHITAKER, R. W., REVELLE, D. O. and TAGLIAFERRI, E. 2002. Multi-station Infrasonic Observations of Two Large Bolides: Signal Interpretation and Implications for Monitoring of Atmospheric Explosions. *Geophys. Res. Lett.* vol. 29, is. 13, pp. 14-1–14-4. DOI: 10.1029/2001GL013778
39. BOROVIČKA, J., WEBER, H. W., JOPEK, T., JACEŠ, P., RANDA, Z., BROWN, P. G., REVELLE, D. O., KALENDA, P., SCHULTZ, L., KUČERA, J., HALODA, J., TÝCOVÁ, P., FRÝDA, J. and BRANDSTÄTTER, F., 2003. The Morávka Meteorite Fall: 3. Meteoroid Initial Size, History, Structure and Composition. *Meteorit. Planet. Sci.* vol. 38, is. 7, pp. 1005–1021. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00295.x
40. PASECHNIK, I. P., 1962. Science has proved that nuclear explosions can be detected anyplace. *Priroda*. no. 7, pp. 3–12 (in Russian).

L. F. Chernogor

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

CHELYABINSK METEOROID ACOUSTIC EFFECTS

Purpose: The parameters (period, time delay, celerity, duration, and the rate of attenuation) of the acoustic signal which was generated during the Chelyabinsk meteoroid passage and explosion on February 15, 2013 are investigated along with atmospheric parameters.

Design/methodology/approach: With the temporal variations in the level of the acoustic signals acquired at an array of acoustic stations, the principal signal parameters are determined and their comparison made with the model results.

Findings: The time delay of the infrasound signal has been shown to increase approximately linearly with the distance between the acoustic source and an observation station. The mean celerity of the infrasound wave is approximately 270 m/s. The signal spectrum exhibits components with periods of 10–100 s, and the harmonic with an approximately 30-s period prevails. The duration of the infrasound signal is established by its source length (50–90 km) and the infrasound signal spreading due to dispersion in the atmosphere that depends on the distance the wave has traveled. The overall duration of the signal is equal to 6–30 min for the range of 540–5780 km. The regression relations between the time delays and the acoustic signal spread-

ing have been determined as a function of path length. The characteristic scale length of infrasound attenuation depends on a specific path and varies within 1000–3000 km. The effect of the moving shock created by the explosion is shown to be much greater than the effect of the ballistic wave almost at all altitudes.

Conclusions: The estimates substantially agree with the observations.

Key words: meteoroid kinetic energy, acoustic efficiency, mean wind speed, acoustic signal duration and time delay, moving shock parameters, oscillation period

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61002, Україна

АКУСТИЧНІ ЕФЕКТИ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДУ

Предмет і мета роботи: Досліджуються параметри акустичного сигналу (період, час запізнення, швидкість приходу, тривалість, коефіцієнт згасання), згенерованого польотом та вибухом Челябінського метеороїду 15 лютого 2013 р., разом з параметрами атмосфери.

Методи та методологія: З використанням часових залежностей рівня акустичних сигналів, зареєстрованих низкою інфразвукових станцій, отримано основні параметри сигналів та виконано їх порівняння з результатами моделювання.

Результати: Показано, що час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався приблизно за лінійним законом зі збільшенням відстані між акустичним джерелом та місцем спостереження. Середня швидкість приходу інфразвукової хвилі становила близько 270 м/с. У спектрі сигналу спостерігались складові з періодом 10 ÷ 100 с, переважала гармоніка з періодом близько 30 с. Тривалість інфразвукового сигналу визначалась протяжністю його джерела (50 ÷ 90 км) та дисперсійним розпливанням інфразвукового сигналу в атмосфері, яке залежало від відстані, що проходила хвиля. Загальна тривалість сигналу складала 6 ÷ 30 хв для відстані 540 ÷ 5780 км. Знайдено регресійні залежності часу запізнення та подовження акустичного сигналу від пройденого шляху. Характерна довжина згасання інфразвуку в залежності від траси складала 1000 ÷ 3000 км. Показано, що ефект вибухової ударної хвилі був значно сильнішим ефекту балістичної хвилі майже на всіх висотах.

Висновок: Результати оцінок та моделювання добре узгоджуються з результатами спостережень.

Ключові слова: кінетична енергія метеороїду, акустична ефективність, середня швидкість вітру, тривалість та час запізнення акустичного сигналу, параметри ударних хвиль, період коливаний

Статья поступила в редакцию 13.12.2016