

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.02.123>

УДК 551.558, 551.596,
534.221

Л. Ф. ЧЕРНОГОР

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

PACS numbers: 94.20.-y,
96.30.Ys

пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

АТМОСФЕРНО-СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

Предмет и цель работы: Исследованы параметры ударно-волнового источника в атмосфере и вызванных им сейсмических колебаний.

Методы и методология: Проведено моделирование атмосферных и сейсмических процессов, вызванных пролетом и взрывом Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г. Результаты моделирования сравнены с результатами наблюдений, выполненных на ряде сейсмических станций.

Результаты: Показано, что продолжительность ударно-волнового воздействия была близка к 97 с, время запаздывания ударной волны в местах разрушений по отношению к моменту ее генерации на высотах $23 \div 53$ км составляло $77 \div 295$ с при удалениях $23 \div 84$ км. Установлено, что длина области разрушений под действием ударной волны при избыточном давлении не менее 0.7 кПа составила $125 \div 130$ км, а ее ширина на разных участках траектории метеороида – $16 \div 60$ км. Найдена регрессия для зависимости длительности сейсмического сигнала от пройденного сейсмической волной расстояния. По результатам расчетов и наблюдений характерное время воздействия сейсмического источника составляло около 40 с. Для сейсмических колебаний с периодом $20 \div 50$ с установлена зависимость групповой скорости от периода. По оценкам, глубина затухания сейсмических волн с частотами $0.25 \div 3.0$ Гц была около $10 \div 20$ Мм, а скорость движения земной коры – $5.7 \div 7.0$ мкм/с.

Заключение: Результаты моделирования и оценок хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Ключевые слова: сейсмограммы; скорость сейсмических волн; длина следа в атмосфере; время распространения; параметры зоны разрушений; параметры сейсмического сигнала; длительность, скорость и коэффициент затухания сейсмического сигнала; амплитуда и скорость волнового движения земной коры; магнитуда и энергия землетрясения

1. Введение

15 февраля 2013 г. под углом к горизонту $\alpha \approx 18^\circ$ в атмосферу Земли вторглось космическое тело диаметром $d \approx 18$ м, массой около 11 тыс. т, со скоростью $v_0 \approx 18.5$ км/с и начальной кинетической энергией $E_{k0} \approx 1.88 \cdot 10^{15}$ Дж ≈ 440 кт ТНТ [1–6]. Тело получило название “Челябинский метеороид”. Целый ряд вызванных Челябинским метеороидом эффектов, возникших в магнитосфере, ионосфере, атмосфере и литосфере, по горячим следам описан в литературе (см., например, [5, 7–20]). В настоящее время продолжается детальный анализ этих эффектов.

Атмосферно-сейсмический эффект метеороидов обсуждается в ряде работ (см., например, [21–25]).

В них продемонстрирована эффективность генерации сейсмических волн такими телами. Анализу сейсмического эффекта, вызванного падением Челябинского метеороида, посвящены работы [26–35].

Падение и взрыв Челябинского метеороида сопровождалось генерацией мощной ударной волны, которая разрушила постройки и травмировала людей. Одновременно с этим ударная волна, достигнув поверхности Земли, возбудила в литосфере сейсмические волны, которые были зарегистрированы большим количеством сейсмических станций на расстояниях в сотни–тысячи километров от места взрыва [30–35]. По данным работ [6, 35] приблизительные координаты источника сейсмических волн следующие: 55.150° с. ш., 61.410° в. д. По другим данным

© Л. Ф. Черногор, 2017

более точные координаты эпицентра взрыва такие: 54.859° с. ш., 61.255° в. д. [27, 28].

По разным данным магнитуда землетрясения, вызванного Челябинским метеороидом была около $2.7 \div 4.0$ [6, 29–34].

Предварительная оценка сейсмического эффекта выполнена в работах [10–12, 20]. Основные закономерности этого эффекта кратко описаны в [35].

Целью настоящей работы является более детальный анализ атмосферного источника ударно-волнового воздействия, оценка его параметров, определение параметров сгенерированных воздушной ударной волной сейсмических колебаний, а также сопоставление результатов моделирования и расчетов с результатами наблюдений.

2. Результаты измерений

2.1. Примеры сейсмограмм

Для наблюдения землетрясения, вызванного ударной волной от метеороида, использовались сейсмограммы, полученные на ряде станций. Перечень станций представлен в табл. 1 [31, 33].

Из большого числа сейсмограмм, полученных по всему Земному шару, вначале приведем сейсмограмму, зарегистрированную на станции “Обнинск”, Калужская обл. (код станции OBN). Расстояние от места взрыва Челябинского метеороида до сейсмической станции составляет $R \approx 1600$ км.

Отфильтрованные в полосе частот $0.05 \div 0.1$ Гц сейсмограммы показаны на рис. 1 [2]. Из рисунка видно, что наилучшим образом выделяется сигнал, соответствующий поверхностной волне (волне Рэлея). Время запаздывания переднего фронта сигнала составило 483 с. При $R \approx 1600$ км имеем оценку скорости распространения волны $v \approx 3.3$ км/с. Такая скорость близка к скорости поверхностных волн [36–38].

Объемные волны от Челябинского метеороида оказались слабыми. В отличие от них поверхностная волна от этого космического тела была достаточно сильной. Это обстоятельство позволило уверенно выделить сигнал, вызванный взрывом космического тела, на фоне шумов, обусловленных другими землетрясениями. При землетрясениях, как известно, генерируются интенсивные объемные волны [37, 38].

Другим примером служат регистрации сейсмограмм на сейсмических станциях “Арти”, PR3, PR4, “Акбулак” (рис. 2) [31–33]. Из рис. 2 видно,

Таблица 1. Перечень сейсмических станций

Код сети	Код станции	Широта, °	Долгота, °
П	AAK	42.64	74.49
Z	ABKAR	49.26	59.94
П	ARU	56.43	58.56
П	BFO	48.33	8.33
KR	BOOM	42.49	75.94
П	BRVK	53.06	70.28
KR	FRU1	42.81	74.63
IU	GNI	40.15	44.74
IU	GRFO	49.69	11.22
IU	KBL	34.54	69.04
KR	KDJ	42.12	77.18
IU	KEV	69.76	27
IU	KIEV	50.7	29.22
П	KIV	43.96	42.69
KZ	KKAR	43.1	70.51
IU	KONO	59.65	9.6
П	KURK	50.72	78.62
IC	LSA	29.7	91.13
П	LVZ	67.9	34.65
IU	MAKZ	46.81	81.98
KZ	MKAR	46.79	82.29
BY	MOY	51.667	100.993
П	NIL	33.65	73.27
KR	NRN	41.42	75.98
П	OBN	55.11	36.57
KR	PRZ	42.47	78.4
П	TLY	51.68	103.64
IU	ULN	47.87	107.05
IU	WMQ	43.81	87.7
BY	YLYR	54.876	111.162
BY	ZAK	50.382	103.281

что скорость v_R колебаний земной коры достигала 10 мкм/с. При этом амплитуда ее колебаний в диапазоне периодов $6 \div 60$ с составляла около $10^{-5} \div 10^{-4}$ м.

2.2. Скорость сейсмических волн

Регистрация сейсмического эффекта от Челябинского метеороида на различных расстояниях от эпицентра взрыва R позволяет вычислить скорость сейсмических волн

$$v_{sw} = \frac{R}{\Delta t'} = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}, \quad (1)$$

где Δt – время запаздывания переднего фронта сейсмического сигнала, Δt_0 – время распространения ударной волны до поверхности Земли.

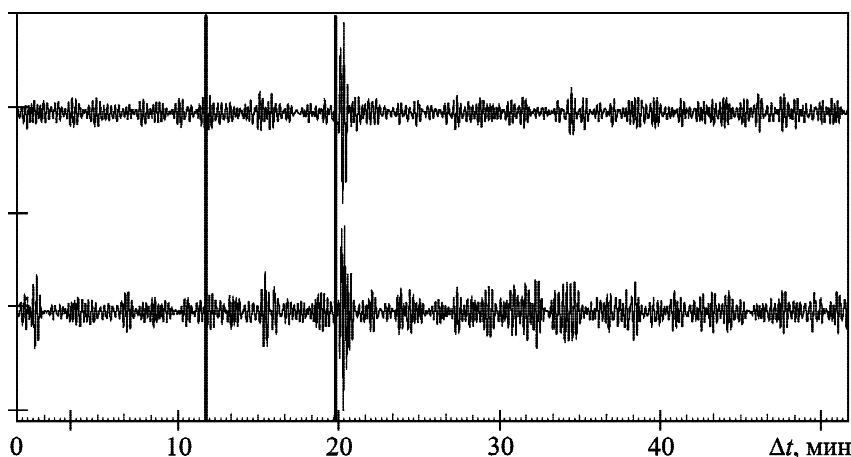


Рис. 1. Отфильтрованные сейсмограммы, зарегистрированные на станции “Обнинск” 15 февраля 2013 г. Вертикальными линиями показаны моменты взрыва Челябинского метеороида и прихода сейсмической волны, отсчитываемые от момента взрыва космического тела (по материалам работы [2])

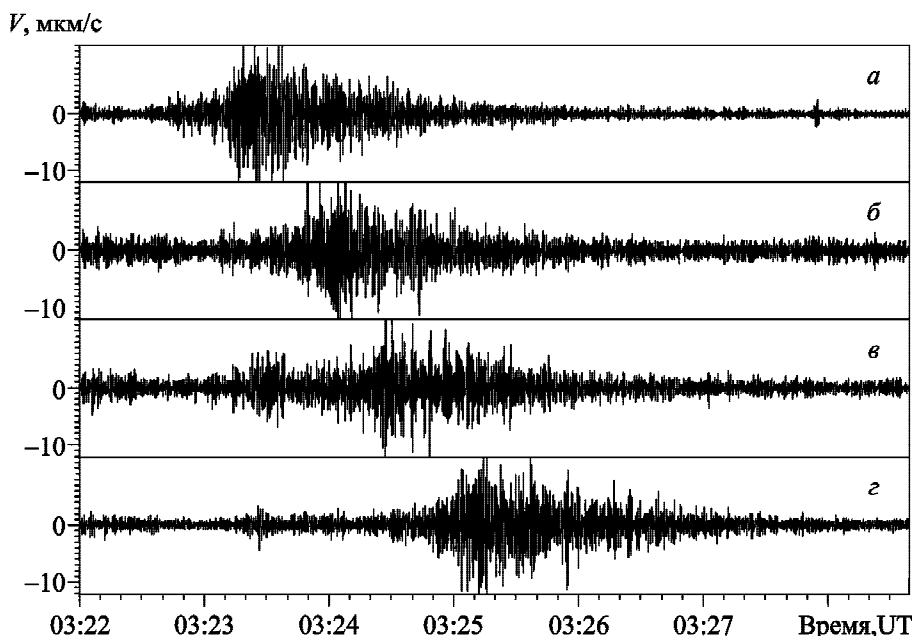


Рис. 2. Сейсмограммы, иллюстрирующие сейсмический эффект, вызванный взрывом Челябинского метеороида: а – станция “Арти” ($R = 249$ км), б – станция PR3 ($R = 400$ км), в – станция PR4 ($R = 493$ км), г – станция “Акбулак” ($R = 620$ км). (По материалам работы [29])

При расчете v_{sw} сначала необходимо оценить время распространения ударной волны от высоты взрыва до поверхности Земли. При температуре воздуха у поверхности $T \approx 260$ К имеем скорость звука $v_s(0) \approx 320$ м/с (см. подраздел 3.2). При увеличении высоты до ~ 10 км значение T постепенно уменьшалось примерно до 190 К, далее до высоты взрыва температура воздуха изменялась незначительно. При $T \approx 190$ К имеем $v_s \approx 270$ км. Среднее по высоте значение $\bar{v}_s \approx 290$ м/с. При

$z_e \approx 23$ км имеем $\Delta t_0 \approx 80$ с. Поскольку \bar{v}_s оценено с погрешностью около 10 м/с, $\Delta t_0 \approx (80 \pm 2.4)$ с.

Измерение времени запаздывания Δt было выполнено с погрешностью около 2.5 с. Тогда среднеквадратическая погрешность оценки $\Delta t'$ составила около 3.5 с.

Результаты расчета v_{sw} по формуле (1) приведены в табл. 2.

Среднее значение $\langle v_{sw} \rangle$ и среднеквадратическая погрешность оценки $\langle v_{sw} \rangle$, рассчитанные по

Таблица 2. Параметры сейсмической волны при взрыве Челябинского метеороида

Станция	“Арти”	PR3	PR4	“Акбулак”
$\Delta t, c$	155 ± 2.5	200 ± 2.5	230 ± 2.5	270 ± 2.5
$\Delta t', c$	75 ± 3.5	120 ± 3.5	150 ± 3.5	190 ± 3.5
$R, км$	249	400	493	620
$v_{sw}, км/с$	3.32 ± 0.15	3.35 ± 0.1	3.28 ± 0.08	3.26 ± 0.06
$\Delta T, c$	110	110	115	120

данным четырех сейсмических станций, составили 3.3 и 0.02 км/с, т. е. $\langle v_{sw} \rangle = (3.30 \pm 0.02)$ км/с. Такое значение скорости близко к скорости поверхностных волн Рэлея. Тем не менее неправомерно отождествлять $\langle v_{sw} \rangle$ со скоростью волн Рэлея, так как расчет v_{sw} производился по времени запаздывания переднего фронта, а не по групповому времени запаздывания.

3. Результаты моделирования атмосферных и сейсмических процессов

3.1. Длина следа в атмосфере

По данным видеорегистраторов время полета метеороида в атмосфере Земли составило около $\Delta t_a = 32 \div 32.5$ с (см., например, [6–9]). Тогда при скорости его движения $v_0 = 18.5$ км/с имеем длину следа в атмосфере

$$L \approx v_0 \Delta t_a \approx 590 \div 600 \text{ км.}$$

Первоначальная ширина следа в атмосфере составляла 1 ÷ 2 км. Вследствие ветров и турбулентной диффузии она со временем значительно увеличивалась.

Протяженность области генерации ударной волны связана с протяженностью области свечения следа метеороида.

Эффективная длительность свечения следа метеороида на уровне 0.1 от максимального значения составляет около 5 с [6]. При $v_0 = 18.5$ км/с имеем протяженность области свечения $L_r \approx 92.5$ км, что соответствует диапазону высот $\Delta z_r = L_r \sin \alpha \approx 30$ км при $\sin \alpha \approx 0.34$. Если свечение прекратилось на высоте $z_e \approx 23$ км, то появиться оно должно было на высоте

$$z_{\max} = z_e + \Delta z_r \approx 53 \text{ км.}$$

3.2. Время распространения ударной волны в атмосфере

В интервале высот, где в основном наблюдалась вспышка (23 ÷ 53 км), эффективно генерировалась ударная волна. Скорость распространения ударной волны зависит от избыточного давления Δp . При $\Delta p \ll p_0$, где p_0 – давление воздуха в невозмущенной атмосфере, она близка к скорости звука в невозмущенной среде v_s . Скорость звука дается известным соотношением:

$$v_s(z) = \sqrt{\frac{\gamma k_B T(z)}{M_n}},$$

где γ – показатель адиабаты, k_B – постоянная Больцмана, $T(z)$ – температура воздуха, $M_n \approx 5.4 \cdot 10^{-26}$ кг – средняя масса молекул воздуха. Температура T существенно изменяется с высотой. Далее принималась следующая модельная зависимость, построенная по данным работы [39]:

$$T(z) = \begin{cases} T_0(1 + z/H_1), & 0 \leq z \leq z_1 = 2 \text{ км,} \\ & H_1 = 34.7 \text{ км;} \\ T_1(1 - (z - z_1)/H_2), & z_1 \leq z \leq z_2 = 10 \text{ км,} \\ & H_2 = 33.8 \text{ км;} \\ T_2 = 210 \text{ К,} & z_2 \leq z \leq z_3 = 23 \text{ км;} \\ T_2(1 + (z - z_3)/H_3), & z_3 \leq z \leq z_4 = 47 \text{ км,} \\ & H_3 = 96.0 \text{ км;} \\ T_3 = 263 \text{ К,} & z_4 \leq z \leq z_5 = 50 \text{ км;} \\ T_3(1 - (z - z_5)/H_4), & z_5 \leq z \leq z_6 = 53 \text{ км,} \\ & H_4 = 157.8 \text{ км;} \end{cases}$$

где $T_0 = T_{z=0} = 260$ К, $T_1 = T(z_1) = 275$ К, $T_2 = T(z_2) = T(z_3) = 210$ К, $T_3 = T(z_4) = T(z_5) = 263$ К, $T(z_6) = 258$ К. Как видно из модели $T(z)$, учитывалась инверсия температуры в приземном слое толщиной не более 2 км, что несущественно повлияло на время запаздывания ударной волны.

Тогда время распространения ударной волны от высоты z до поверхности Земли ($z = 0$) составляет

$$\Delta t(z) = \int_0^z \frac{dz}{v_s(z)}.$$

Интегрируя и производя численные расчеты, получим, что времена распространения волны от высоты z_1 до 0, от z_2 до z_1 , от z_3 до z_2 , от z_4 до z_3 , от z_5 до z_4 и от z_6 до z_5 равны соответственно $\Delta t_1 = 6.1$ с, $\Delta t_2 = 26.0$ с, $\Delta t_3 = 45.1$ с, $\Delta t_4 = 78.7$ с, $\Delta t_5 = 9.3$ с и $\Delta t_6 = 9.4$ с. Тогда минимальное и максимальное времена распространения ударной волны соответственно от высоты $z_e = z_3$ и от высоты z_6 до соответствующего эпицентра равны

$$\Delta t_{\min} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = 77.2 \text{ с,}$$

$$\Delta t_{\max} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 = 174.6 \text{ с.}$$

Этим временам запаздывания соответствуют средние по высоте скорости \bar{v}_s , равные 298 и 303.6 м/с.

Наблюдения показали, что минимальный промежуток времени, прошедший от момента максимума вспышки до момента прихода ударной волны, равный 77 с, имел место в населенном пункте Первомайский (см., например, [6]). Важно, что наблюдаемое значение (77 с) и расчетное значение (77.2 с) оказались очень близкими друг к другу.

Для Челябинска время задержки ударной волны составило от 2 мин 15 с до 2 мин 52 с, или от 135 до 172 с [6]. По расчетам при расстоянии от городских границ до проекции траектории на поверхность Земли $R_0 \approx 32 \div 45$ км и при $\bar{v}_s \approx 298$ м/с имеем $R \approx 39 \div 51$ км, $\Delta t \approx 131 \div 171$ с.

Для наиболее удаленного населенного пункта Троицк $R_0 \approx 75$ км, а высота генерации ударной волны $z \approx 43$ км. Тогда $R \approx 86$ км, $\Delta t \approx 290$ с. Наблюдения дали значение 4 мин 55 с, или 295 с [6].

Из сравнения результатов оценок и наблюдений видно их хорошее согласие.

Ударная волна, генерируемая в окрестности высоты $z_e \approx 23$ км, как показали расчеты [12, 20] и наблюдения, при $\Delta p \geq 0.7$ кПа способна вызывать разрушения в радиусе около $R_0 \approx 30$ км от эпицентра. При этом расстояние

$$R = \sqrt{z_e^2 + R_0^2} \approx 38 \text{ км,}$$

а время распространения акустической волны $\Delta t_R = R/\bar{v}_s \approx 130$ с. Продолжительность ударно-волнового воздействия

$$\Delta T = \Delta t_{\max} - \Delta t_{\min} \approx 97 \text{ с.}$$

3.3. Параметры зоны разрушений

Уже на высоте полета метеороида $z_{\max} \approx 53$ км генерируемая ударная волна была достаточно сильной (на поверхности Земли $\Delta p \approx 0.7 \div 1$ кПа), чтобы вызвать разрушения в эпицентре и в его окрестности с радиусом r_1 . При дальнейшем падении космического тела избыточное давление у поверхности Земли постепенно увеличивалось примерно до 3 кПа и радиус зоны разрушений, где $\Delta p \approx 0.7$ кПа, увеличивался до r_2 . Наши расчеты по методике, описанной в работе [12], показали, что зона избыточного давления $\Delta p \geq 0.7$ кПа имела минимальную ширину $2r_1 \approx 16$ км, максимальную ширину $2r_2 \approx 60$ км и расстояние между эпицентрами, соответствующими высотам 53 и 23 км, равное $L_r \cos \alpha \approx 87$ км. Тогда длина наземной области разрушений

$$L_d = r_1 + L_r \cos \alpha + r_2 \approx 125 \text{ км.} \quad (2)$$

Полученное расчетное значение (2) очень близко к наблюдаемому значению $L_d \approx 130$ км [31, 33].

3.4. Параметры сейсмического сигнала

Пространственно-временные вариации сейсмического сигнала приведены на рис. 3. За основу взят рисунок из работы [31]. Как видно из рис. 3, большему значению R соответствует большее значение Δt . Прямая линия 2 на рис. 3 соединяет центры цугов, которые должны соответствовать времени запаздывания Δt_g основной части сигнала, а значит, и групповой скорости сигнала v_g . Из рис. 3 видно, что при $R = 0$ начальное время задержки $\Delta t \approx 77$ с. Заметим, что в работе [31] считалось, что $\Delta t = 0$, но это условие не отвечает физическим процессам, приводящим к генерации сейсмических колебаний. Предположение, что $\Delta t = 0$, привело в работе [31] к несуществующей нелинейности в зависимости скорости сейсмических волн от пройденного расстояния. Определенная из данных наблюдений величина Δt очень близка к расчетному значению минимального времени распространения акустического сигнала от высоты z_e до поверхности Земли ($\Delta t_{\min} \approx 77.2$ с). Величина dR/dt в момент времени Δt_g дает значение групповой скорости. Среднее по всем сейсмическим станциям значение групповой скорости оказалось равным 3.08 ± 0.04 км/с. Добавим, что линии 1 и 3 на рис. 3 характеризуют скорости переднего и заднего фронтов сейсмической волны.

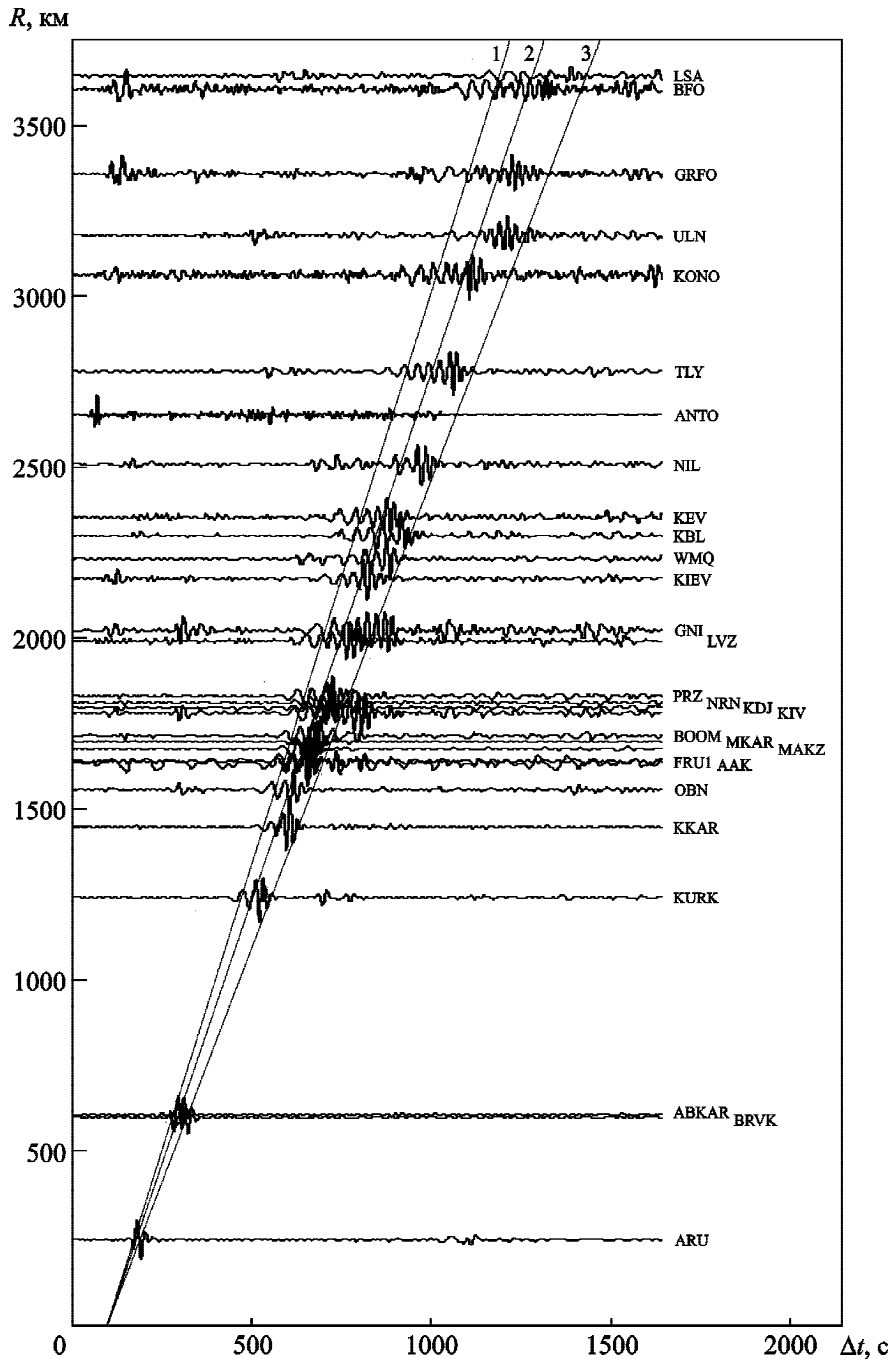


Рис. 3. Зависимость времени запаздывания Δt сейсмического сигнала в полосе частот $0.01 \div 0.05$ Гц, отсчитываемого от момента взрыва метеороида, от расстояния между источником землетрясения и сейсмической станцией R : линия 1 – скорость переднего фронта волны; линия 2 – скорость основной части сигнала (групповая скорость); линия 3 – скорость заднего фронта волны

Спектральный анализ сейсмограмм показал, что основная энергия сигнала сосредоточена в диапазоне частот $0.3 \div 3$ Гц [31].

Длительность сейсмического сигнала. При увеличении R увеличивалась протяженность ΔT отфильтрованного в полосе частот $0.01 \div 0.05$ Гц

сигнала (см. рис. 3). Зависимость ΔT от R представлена на рис. 4. Из рис. 4 видно, что значения ΔT возрастали по линейному закону при увеличении расстояния R . Найденное уравнение соответствующей регрессии имеет вид:

$$\Delta T = \Delta T_0 + a_R R,$$

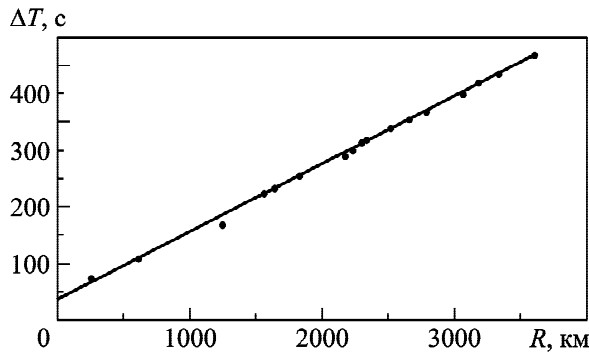


Рис. 4. Зависимость длительности сейсмического сигнала от расстояния между эпицентром землетрясения и сейсмической станцией

где $\Delta T_0 \approx 39$ с, $a_R \approx 0.12$ с/км.

При длине зоны разрушений $L_d \approx 130$ км, установленной путем наблюдений, и скорости рэлеевской волны $c_s \approx 3.1$ км/с имеем характерное время (продолжительность) воздействия сейсмического источника $\Delta T_s = L_d/c_s \approx 39.4$ с. Расчетное значение ΔT_s очень близко к экспериментальному значению $\Delta T_0 \approx 39$ с.

Удлинение сейсмического сигнала обусловлено дисперсионным расплыванием. При законе дисперсии $v_g \sim T^{1/3}$ (см. далее) имеем

$$\Delta T_d = \Delta t_2 - \Delta t_1 = R \left(\frac{1}{v_{g2}} - \frac{1}{v_{g1}} \right) = \frac{R}{v_{g1}} \left(\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/3} - 1 \right),$$

где индексы 1 и 2 относятся к переднему и заднему фронтам.

При $T_1 \approx 50$ с, $T_2 \approx 16$ с имеем $v_{g1} = 3.77$ км/с (см. табл. 3), а $\Delta T_d \approx 0.12R$, где R выражается в километрах. При этом расчетное значение $a_R = 0.12$ с/км практически совпадает с экспериментальным значением. Например, при $R = 1 \div 4$ тыс. км имеем $\Delta T_d = 120 \div 480$ с = $2 \div 8$ мин, а $\Delta T \approx 159 \div 519$ с = $2.65 \div 8.65$ мин. Для сравнения укажем, что в работе [36] при

$R = 1 \div 4$ тыс. км $\Delta T \approx 150 \div 500$ с, что хорошо согласуется с результатами наших оценок.

Скорость фронтов сейсмического сигнала. Спектральный анализ сейсмического сигнала в полосе частот $0.01 \div 0.06$ Гц показал, что в спектре содержатся в основном гармоники с периодами от 16 до 50 с, причем в пункт наблюдения раньше приходят гармоники с большими периодами (см. рис. 3). При $T \approx 50$ с скорость переднего фронта близка к 3.77 км/с, а при $T \approx 16$ с скорость заднего фронта равна 2.70 км/с. Это означает, что наблюдается частотная дисперсия сейсмического сигнала с периодом $16 \div 50$ с, которая практически отсутствует для более высокочастотных (с периодом $0.1 \div 1$ с) поверхностных волн (см., например, [40]). О наличии дисперсии свидетельствует также факт удлинения сейсмического сигнала при увеличении расстояния от эпицентра до сейсмической станции. Существование дисперсии сейсмических волн с периодом $T \approx 36 \div 50$ с, по-видимому, вызвано тем, что их длина волны $\lambda_s \approx 50 \div 150$ км соизмерима с толщиной тектоносферы, где генерируются землетрясения и распространяются поверхностные сейсмические волны.

По данным наблюдений закон дисперсии был аппроксимирован следующим выражением:

$$v_g = aT^{1/3} = b/\omega^{1/3}, \tag{3}$$

где $a \approx 1.06$ км/с^{4/3}, $b \approx 1.96$ км/с^{4/3}, $\omega = 2\pi/T$ – круговая частота сейсмической волны.

Заметим, что зависимость (3) хорошо согласуется с результатами работы [25].

При законе дисперсии (3) выражения для показателя преломления n и фазовой скорости v_{ph} имеют вид:

$$n = \frac{3c_s}{4b} \omega^{1/3} = \frac{3c_s}{4aT^{1/3}},$$

$$v_{ph} = \frac{4b}{3\omega^{1/3}} = \frac{4}{3} aT^{1/3} = \frac{4}{3} v_g. \tag{4}$$

Таблица 3. Зависимость экспериментальных v_{ge} и расчетных v_g значений групповой скорости и относительной разницы $\Delta = v_g/v_{ge} - 1$ от периода сейсмических волн

T, c	20	25	30	35	40	45	50
$v_{ge}, км/с$	2.93	3.02	3.24	3.48	3.60	3.69	3.77
$v_g, км/с$	2.88	3.10	3.29	3.46	3.63	3.77	3.91
$\Delta, \%$	-1.7	2.6	1.5	-0.6	0.8	2.2	3.7

Из соотношения (4) видно, что $v_{ph} = \frac{4}{3}v_g$.

Имея соотношение (3), можно рассчитать групповую скорость, соответствующую средней частоте в спектре сейсмического сигнала, для которой период равен 28 с. При этом групповая скорость $v_g \approx 3.22$ км/с. Расчетное значение групповой скорости очень близко к наблюдаемому среднему значению $v_g \approx 3.1$ км/с. Заметим, что диапазон периодов сейсмических колебаний 16 ÷ 50 с определяется диапазоном периодов ударно-волнового воздействия, который обусловлен колебанием нагретого воздуха в следе метеороида. По данным инфразвуковых наблюдений [41] и нашим расчетам средний период близок к 30 с.

Добавим, что в работе [26] также изучаются дисперсионные свойства сейсмических волн в диапазоне периодов 15 ÷ 50 с. Результаты сравнения экспериментальных значений скорости v_{ge} по данным работы [26] и расчетных значений скорости v_g по формуле (3) приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что различие в этих скоростях не превышает нескольких процентов.

Затухание поверхностных волн. Авторы работ [31, 33] приводят выражение для оценки сейсмической добротности Q в зависимости от частоты f преобладающих колебаний:

$$Q(f) = 1700e^{1.2f} \equiv Q_0e^{ikf},$$

где $Q_0 = 1700$, $k = 1.2 \text{ Гц}^{-1}$. С другой стороны, по определению, добротность

$$Q = \frac{\omega}{2\beta} = \pi \frac{f}{\beta},$$

где ω и f – круговая и линейная резонансные частоты в колебательной системе, β – коэффициент затухания. Этот коэффициент определяет скорость затухания амплитуды колебания во времени (или волны с расстоянием R):

$$A(t) = A_0e^{-\beta t} = A_0e^{-\gamma_R R},$$

Таблица 4. Параметры затухания сейсмических волн

f , Гц	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	2.75	3.0
$\beta \cdot 10^4$, с ⁻¹	3.4	5.1	5.7	5.6	5.2	4.6	4.0	3.4	2.8	2.3	1.9	1.5
$\gamma_R \cdot 10^4$, км ⁻¹	1.1	1.6	1.8	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.90	0.74	0.61	0.49
L_γ , Мм	9.09	6.25	5.44	5.56	6.01	6.76	7.81	9.24	11.09	13.51	16.5	20.4

где $\gamma_R = \beta/c_s$. При $c_s \neq c_s(f)$ для коэффициентов β и γ_R имеем

$$\beta(f) = \frac{\pi}{kQ} \ln \frac{Q}{Q_0} = \frac{\pi f}{Q_0} e^{-kf},$$

$$\gamma_R(f) = \frac{\pi}{kQc_s} \ln \frac{Q}{Q_0} = \frac{\pi f}{Q_0c_s} e^{-kf}.$$

Результаты расчета β и γ_R для $c_s = 3.1$ км/с приведены в табл. 4, из которой видно, что глубина затухания поверхностных волн в горизонтальном направлении $L_\gamma = \gamma_R^{-1}$ примерно равняется 5 ÷ 20 Мм, а характерное время их затухания составляет 1 ÷ 2 ч.

3.5. Параметры землетрясения

Амплитуда и скорость колебаний упругой среды. Ударная волна, взаимодействуя с поверхностью Земли, вызвала напряжения в упругой среде, а значит и генерацию сейсмических волн.

Уравнение движения массы единицы объема упругой среды (поверхности твердой оболочки Земли) имеет вид [40]:

$$\rho_i \ddot{a}_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (5)$$

где ρ_i – объемная плотность упругой среды (литосферы), \ddot{a}_i – ускорение движения упругой среды в направлении i -й координаты, σ_{ik} – тензор напряжений, x_k – k -я координата.

Перейдем в уравнении (5) к оценкам производных. При этом учтем, что для гармонического колебания с периодом T и амплитудой A_i

$$a_i = A_i \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right).$$

Тогда модуль амплитуды ускорения

$$|\ddot{a}_i| = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 A_i. \quad (6)$$

Оценка правой части уравнения (5) дает

$$\left| \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \right| \approx \frac{\Delta p}{r_0}, \quad (7)$$

где Δp – избыточное давление, вызванное ударной волной, на границе круга радиусом r_0 . Подставляя (6) и (7) в (5), получим следующую оценку амплитуды смещения упругой среды:

$$A_i \approx \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \frac{\Delta p}{\rho_l r_0}. \quad (8)$$

При $T \approx 0.9 \div 1.1$ с, $\Delta p \approx 1$ кПа, $r_0 \approx 10$ км и $\rho_l \approx 2.5 \cdot 10^3$ кг/м³ из (8) имеем $A_i \approx (8.2 \div 12.3) \cdot 10^{-7}$ м. Добавим, что такие же значения $\Delta p/r_0$ и A_i получаем и при разности давлений $\Delta p \approx 3$ кПа между эпицентром взрыва и границей круга радиусом $r_2 \approx 30$ км (см. выше). Тогда амплитуда скорости смещения упругой среды

$$v_i = \frac{2\pi}{T} A_i \approx (5.7 \div 7.0) \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

Результаты наблюдений дали значения $v_i \approx (5.8 \div 7.0) \cdot 10^{-6}$ м/с при $R \approx 620 \div 249$ км (см. рис. 2).

Из соотношений (5) и (7) следует выражение для оценки ускорения движения упругой среды:

$$|\ddot{a}_i| \approx \frac{\Delta p}{\rho_l r_0}.$$

При $\Delta p = 1$ кПа, $r_0 = 10$ км и $\rho_l \approx 2.5 \cdot 10^3$ кг/м³ получим амплитуду ускорения $|\ddot{a}_i| \approx 4 \cdot 10^{-5}$ м/с².

Оценку A_i также можно получить, исходя из закона Гука. Смещение упругой среды (земной коры) под действием ударной волны

$$A_i = \frac{\Delta p}{K} h,$$

где K – модуль сжатия упругой среды, h – толщина слоя земной коры, возмущенной ударной волной. При $\Delta p = 1$ кПа, $K = 5 \cdot 10^{10}$ Н/м² и $h \approx 50$ м [42] имеем $A_i \approx 10^{-6}$ м. Полученная оценка близка к оценке, даваемой соотношением (8).

Магнитуда и энергия землетрясения. Для оценки магнитуды землетрясения по амплитуде или скорости движения земной коры воспользуемся следующим соотношением (см., например, [31, 33]):

$$M_s = \lg \frac{A_i}{T} + 1.66 \lg D_R + 3.3 = \lg \frac{v_i}{2\pi} + 1.66 \lg D_R + 3.3, \quad (9)$$

где D_R – эпицентральное расстояние, градусы; A_i – амплитуда, мкм; v_i – скорость, мкм/с. Расчет по формуле (9) дает $M_s \approx 3.6 \div 4.2$ при $v_i \approx 5.8 \div 7.0$ мкм/с.

Для оценки сейсмической энергии E_{sw} воспользуемся известным соотношением (см., например, [37, 38]):

$$\lg E_{sw} = 4.8 + 1.5 M_s. \quad (10)$$

Вычисления по формуле (10) дают $E_{sw} \approx 1.6 \cdot 10^{10} \div 3.5 \cdot 10^{11}$ Дж. При энергии, затрачиваемой на генерацию ударной волны $E_d = 0.3 E_{k0} \approx 5.6 \cdot 10^{14}$ Дж имеем

$$\eta = \frac{E_{sw}}{E_d} \approx 2.8 \cdot 10^{-5} \div 6.3 \cdot 10^{-4},$$

т. е. в энергию сейсмической волны перешло $2.8 \cdot 10^{-5} \div 6.3 \cdot 10^{-4}$ энергии ударной волны или $8.5 \cdot 10^{-6} \div 1.9 \cdot 10^{-4}$ начальной кинетической энергии метеороида. Последние числа близки к значениям $10^{-5} \div 10^{-4}$, которые приводятся в литературе [38].

При использовании значений амплитуд сейсмических колебаний, приведенных в работах [31, 33], из формулы (9) при $D_R = 15^\circ \div 35^\circ$ получим $M_s = 3.7 \div 3.8$. Авторы работ [31, 33] отмечают, что формула (9) применима при $D_R \geq 15^\circ$. При $M_s = 3.7 \div 3.8$ имеем $E_{sw} \approx 2.2 \cdot 10^{10} \div 3.2 \cdot 10^{10}$ Дж. Тогда $\eta \approx 3.9 \cdot 10^{-5} \div 5.7 \cdot 10^{-5}$. Авторы [31, 33] получили $\eta \approx 5 \cdot 10^{-5}$.

4. Обсуждение

Ударная волна цилиндрического типа начинает эффективно генерироваться на высотах, где возникает режим обтекания космического тела сплошной средой. Такой режим реализуется при условии, что число Кнудсена удовлетворяет следующему условию (см., например, [43]):

$$\text{Kn} = l_n / d < 10^{-2} \text{Re}^{1/2}.$$

Здесь l_n – длина свободного пробега молекул, d – диаметр космического тела, Re – число Рейнольдса. Такое условие при пролете Челябинского метеороида имело место начиная с высоты 60 км, на которой $l_n \sim 10^{-4}$ м, $\text{Kn} \sim 10^{-5}$, $\text{Re} \sim 10^{-6}$.

Ударная волна генерировалась вплоть до достижения Челябинским метеороидом высоты взрыва (около 23 км). При этом на цилиндрическую ударную волну наложилась взрывная ударная волна. Разумеется, деление ударной волны на цилиндрическую и взрывную волны является условным и удобным при проведении числовых оценок. Так сформировался атмосферный ударно-волновой источник сейсмических волн в литосфере. Источник больше вытянут вдоль траектории метеороида, чем в поперечном направлении. Это предопределило конфигурации области разрушений построек и сейсмического источника литосферных колебаний. Расчеты показали, что длина области разрушений составляла около 125 км, а ширина в зависимости от высоты полета метеороида изменялась от 16 до 60 км. Естественно, что уменьшение высоты полета космического тела сопровождалось расширением области разрушений. Наблюдения дали близкие значения.

По расчетам ударная волна достигла поверхности Земли в зависимости от высоты полета космического тела через $77 \div 175$ с. По данным наблюдений этот интервал времени составлял $77 \div 172$ с. При удалении от эпицентра взрыва время запаздывания ударно-волнового воздействия увеличивалось по расчетам до 290 с. Наблюдения в Троицке дали время запаздывания, равное 295 с.

Знание времени запаздывания ударной волны и расстояния до места наблюдения позволило определить среднюю скорость распространения волны и сравнить с вычисленной.

Зависимость времени запаздывания сейсмического сигнала и его формы от расстояния до станций, изменяющегося от 250 до 3650 км, несет в себе богатую информацию о сигнале и среде распространения: характерном времени воздействия сейсмического источника, скорости переднего и заднего фронтов сигнала, групповой скорости сигнала, глубине его затухания, законе дисперсии сигнала, сейсмической добротности, а также амплитуде и скорости колебаний земной коры.

Предложенные простые модели сейсмического источника позволили оценить его время воздействия, амплитуду, скорость и ускорение движения упругой среды (земной коры). При этом важно, что модельные расчеты параметров сейсмического источника хорошо согласуются с результатами наблюдений.

В работе предложена также эмпирическая зависимость длительности сейсмического сигнала от расстояния между эпицентром землетрясения и сейсмической станцией, которая получила теоретическое обоснование.

Таким образом, соответствие модельных представлений об ударно-волновом и сейсмическом источниках и их параметрах результатам наблюдений свидетельствует об адекватности предложенных моделей (табл. 5). Из табл. 5 можно видеть, что различие между значениями соответствующих параметров несущественно.

5. Выводы

1. Оцененная по данным сейсмических наблюдений магнитуда землетрясения, вызванного действием ударной волны от метеороида, была близка к $3.6 \div 4.2$.

В энергию сейсмических волн преобразовалось около $10^{-5} \div 10^{-4}$ начальной кинетической энергии метеороида.

2. По расчетам и данным наблюдений время запаздывания ударной волны в местах разрушений по отношению к моменту ее генерации на высотах $23 \div 53$ км составляло $77 \div 295$ с (при удалении $23 \div 84$ км).

Таблица 5. Сопоставление результатов моделирования и наблюдений

Параметр	Значение, полученное из наблюдений	Значение, полученное из расчетов
Минимальное время распространение ударной волны, с	77	77.2
Максимальное время распространение ударной волны, с	295	296
Продолжительность ударно-волнового воздействия, с	95	97
Продолжительность воздействия сейсмического источника, с	39	39.4
Коэффициент с/км	0.12	0.12
Групповая скорость сейсмического сигнала, км/с	3.1	3.2
Средний период, с	28	30
Скорость колебаний земной коры, мкм/с	$5.8 \div 7.0$	$5.7 \div 7.0$

Продолжительность ударно-волнового воздействия была близка к 97 с.

3. По расчетам и результатам наблюдений длина области разрушений от действия ударной волны при избыточном давлении не менее 0.7 кПа составила около 125 ÷ 130 км, а ее ширина на разных участках траектории космического тела – 16 ÷ 60 км.

4. Установленная по регистрациям сейсмограмм средняя скорость сейсмических волн равняется 3.08 км/с (по расчетам – 3.07 км/с). Это означает, что высотный взрыв метеороида генерирует в основном поверхностную волну Рэлея.

5. Найдена регрессия для зависимости длительности сейсмического сигнала от пройденного сейсмической волной расстояния. По результатам расчетов и наблюдений характерное время действия сейсмического источника составляло около 40 с.

6. Для сейсмических колебаний с периодом 20 ÷ 50 с установлена дисперсионная зависимость ($v_g \sim T^{1/3}$). При этом $v_{ph} = \frac{4}{3}v_g$.

7. Оценена глубина затухания сейсмических волн (~10 ÷ 20 Мм) для диапазона частот 0.25 ÷ 3.0 Гц.

8. По оценкам амплитуда скорости движения земной коры при ударно-волновом воздействии составляла около 5.7 ÷ 7.0 мкм/с, а по результатам наблюдений – 5.8 ÷ 7.0 мкм/с (для $T \approx 1$ с).

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., Гившивили 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., Тертыхников 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., Ibadov F. S., and Ibadov S. I. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion // *Sol. Syst. Res.* – 2013. – Vol. 47, No. 4. – P. 268–274. DOI: 10.1134/S0038094613040151
4. *Астрономический вестник.* – 2013. – Т. 47, № 4. (Тематический выпуск).
5. Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. Н. А. Антипина. – Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. – 694 с.
6. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года // *Астрономический вестник.* – 2013. – Т. 47, № 4. – С. 262–277.
7. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных // *Динамические процессы в геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН.* – 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 recovery, and characterization // *Science.* – 2013. – Vol. 342, Is. 6162. – P. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
9. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., 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 recovery, 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 Ра, 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., Гармаиш 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, следовавших 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. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнисенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. Н. А. Антипина. – Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. – С. 364–376.
20. 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.
21. Ben-Menahem A. Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations // Phys. Earth Planet. Inter. – 1975. – Vol. 11, Is. 1. – P. 1–35. DOI: 10.1016/0031-9201(75)90072-2
22. ReVelle D. O. On meteor-generated infrasound // J. Geophys. Res. – 1976. – Vol. 81. – P. 1217–1231. DOI: 10.1029/JA081i007p01217
23. Anglin F. M. and Haddon R. A. W. Meteoroid sonic shock-wave generated seismic signals observed at a seismic array // Nature. – 1987. – Vol. 328, No. 6131. – P. 607–609. DOI: 10.1038/328607a0
24. 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.
25. Edwards W. N., Eaton D. W., and Brown P. G. Seismic observations of meteors: Coupling theory and observations // Rev. Geophys. – 2008. – Vol. 46, Is. 4. – id. RG4007. DOI: 10.1029/2007RG000253
26. Tauzin B., Debayle E., Quantin C., and Coltice N. Seismoacoustic coupling induced by the breakup of the 15 February 2013 Chelyabinsk meteor // Geophys. Res. Lett. – 2013. – Vol. 40. – P. 3522–3526. DOI: 10.1002/grl.50683
27. Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Еманов А. А., Белинская А. Ю. Метеороид “Челябинск” (взгляд сейсмолога) // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452, № 3. – С. 326–328. DOI: 10.7868/S0869565213280207
28. Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Еманов А. А., Белинская А. Ю. Метеороид Челябинск (взгляд сейсмолога) // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. Н. А. Антипина. – Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. – С. 678–682.
29. Сейсмограммы взрыва метеорита, упавшего на территории Челябинской области 15 февраля 2013 г. в районе г. Еманжелинск (2014). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pts.mi-rem.ru/region/korkino_meteor.htm
30. Бернгардт О. И., Добрынина А. А., Жеребцов Г. А., Михалев А. В., Перевалова Н. П., Ратовский К. Г., Рахматулин Р. А., Саньков В. А., Сорокин А. Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452. – № 2. – С. 205–207. DOI: 10.7868/80869565213270157
31. Добрынина А. А., Саньков В. А., Чечельницкий В. В., Черных Е. Н. Сейсмические эффекты метеороида Челябинск // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. Н. А. Антипина. – Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. – С. 668–677.
32. Добрынина А. А., Чечельницкий В. В., Черных Е. Н., Саньков В. А. Челябинский метеороид: сейсмические эффекты // Вестник НЯЦ РК. – 2014. – Вып. 2. – С. 105–109.
33. Добрынина А. А., Чечельницкий В. В., Черных Е. Н., Саньков В. А. Челябинский метеороид: сейсмологические наблюдения // Солнечно-земная физика. Сборник. – Иркутск: Изд-во СО РАН. – 2013. – Вып. 24. – С. 46–53.
34. The United States Geological Survey Earthquake Hazards Program (2017). Latest Earthquakes. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usc000f7rz#general_summary
35. Черногор Л. Ф. Сейсмический эффект Челябинского метеороида // 15th Ukrainian conference on space research. Odesa, Ukraine. 24 – 28 August 2015. Abstracts. – Kyiv, 2015. – P. 150.
36. Ritzwoller M. H. and Levshin A. L. Eurasian surface wave tomography: Group velocities // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103, No. B3. – P. 4839–4878. DOI: 10.1029/97JB02622
37. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
38. Пасечник Н. П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях – М.: Наука, 1970. – 193 с.
39. Ионов Г. В. Определение траектории челябинского болида по записям автомобильных видеорегистраторов и моделирование движения фрагмента в атмосфере. // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. Н. А. Антипина. – Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. – 694 с.
40. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том VII. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
41. 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.

42. Langston C. A. Seismic ground motions from a bolide shock wave // *J. Geophys. Res.* – 2004. – Vol. 109, Is. B12. – id. B12309. DOI: 10.1029/2004JB003167
43. Бронитэн В. А. Физика метеорных явлений. – М.: Наука, 1981. – 416 с.

REFERENCES

- 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).
- 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).
- 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
- SOLAR SYSTEM RESEARCH. 2013. vol. 47, no. 4. (*Thematical issue*).
- ANTIPIN, N. A., ed. 2014. *The Chelyabinsk Meteorite – one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ. (in Russian).
- 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., NARONENKOV, 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
- 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).
- POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELIANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. G., KUIPER, J., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHEKNO, A. V., SCHMITTKOPPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABBA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. vol. 342, is. 6162, pp. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
- POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELIANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. G., KUIPER, J., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHEKNO, A. V., SCHMITTKOPPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABBA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science* [online]. vol. 342. [viewed 30 January 2017]. Available from: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1
- CHERNOGOR, L. F. and ROZUMENKO, V. T., 2013. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Technol.* vol. 86, no. 4, pp. 136–139.
- 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)
- CHERNOGOR, L. F., 2013. Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaya fizika*. no. 8, pp. 23–40 (in Russian).
- 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).
- 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).
- CHERNOGOR, L. F., MILOVANOV, YU. B., FEDORENKO, V. N. and TSYMBAL, A. M., 2013. Satellite observa-

- tions 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. POPOVA, O. P., SHUVALOV, V. V., RYBNOV, Y. S., KHARLAMOV, V. A., GLAZACHEV, D. O., EMELYANENKO, V. V., KARTASHOVA, A. P. and JENNISKENS, P., 2014. Chelyabinsk meteoroid: data analysis. 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. 364–376 (in Russian).
 20. 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).
 21. BEN-MENAHM, A., 1975. Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations. *Phys. Earth Planet. Inter.* vol. 11, is. 1, pp. 1–35. DOI: 10.1016/0031-9201(75)90072-2
 22. REVELLE, D. O., 1976. On meteor-generated infrasound. *J. Geophys. Res.* vol. 81, pp. 1217–1231. DOI: 10.1029/JA081i007p01217
 23. ANGLIN, F. M. and HADDON, R. A. W., 1987. Meteoroid sonic shock-wave generated seismic signals observed at a seismic array. *Nature*. vol. 328., no. 6131, pp. 607–609. DOI: 10.1038/328607a0
 24. 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
 25. EDWARDS, W., EATON, D. and BROWN, P., 2008. Seismic observations of meteors: Coupling theory and observations. *Rev. Geophys.* vol. 46, is. 4, id. RG4007. DOI: 10.1029/2007RG000253
 26. TAUZIN, B., DEBAYLE, E., QUANTIN, C. and COLTICE N., 2013. Seismoacoustic coupling induced by the breakup of the 15 February 2013 Chelyabinsk meteor. *Geophys. Res. Lett.* vol. 40, pp. 3522–3526. DOI: 10.1002/grl.50683
 27. SELEZNEV, V. S., LISEIKIN, A. V., EMANOV, A. A. and BELINSKAYA, A. YU., 2013. The Chelyabinsk meteoroid: A seismologist's view. *Doklady Earth Sciences*. vol. 452, is. 1, pp. 976–978. DOI: 10.1134/S1028334X13090195
 28. SELEZNEV, V. S., LISEIKIN, A. V., EMANOV, A. A. and BELINSKAYA, A. YU., 2014. Meteoroid “Chelyabinsk” (The view of seismologist). 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. 678–682 (in Russian).
 29. SEISMOGRAMM OF THE METEORITE EXPLOSION OVER CHELYABINSK REGION FEBRUARY 15, 2013 NEAR EMANZHELINSK, 2014. [online] Available from: http://pts.mi-perm.ru/region/korkino_meteor.htm
 30. BERNGARDT, O. I., DOBRYNINA, A. A., ZHEREBTSOV, G. A., MIKHALEV, A. V., PEREVALOVA, N. P., RATOVSII, K. G., RAKHMATULIN, R. A., SAN'KOV, V. A. and SOROKIN, A. G., 2013. Geophysical phenomena accompanying the Chelyabinsk meteoroid impact. *Doklady Earth Sciences*. vol. 452, is. 1, pp. 945–947. DOI: 10.1134/S1028334X13090080
 31. DOBRYNINA, A. A., SAN'KOV, V. A., CHECHELNITSKY, V. V. and CHERNYKH, E. N., 2014. Seismic effects of Chelyabinsk meteoroid. 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. 668–677 (in Russian).
 32. DOBRYNINA, A. A., CHECHELNITSKY, V. V., CHERNYKH, E. N. and SAN'KOV, V. A., 2014. Chelyabinsk meteoroid: seismic effects. *NNC RC Bulletin*. is. 2., pp. 105–109 (in Russian).
 33. DOBRYNINA, A. A., CHECHELNITSKY, V. V., CHERNYKH, E. N. and SAN'KOV, V. A., 2014. Chelyabinsk meteoroid: seismological observations. In: *Geophys. Res. Abstr.* vol. 16, id. EGU2014-1889.
 34. THE UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY EARTHQUAKE HAZARDS PROGRAM, 2017. *Latest Earthquakes* [online]. [viewed 16 March 2017]. Available from: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usc000f7rz#general_summary
 35. CHERNOGOR L. F., 2015. Seismic Effects of Chelyabinsk Meteoroid. *15th Ukrainian conference on space research abstracts*. Odesa, Ukraine. 24 – 28 August 2015. Kyiv, pp. 150 (in Russian).
 36. RITZWOLLER, M. H. and LEVSHIN, A. L., 1998. Eurasian Surface Wave Tomography: Group Velocities. *J. Geophys. Res.* vol. 103, no. B3., pp. 4839–4878. DOI: 10.1029/97JB02622
 37. SADOVSKY, M. A., BOLHOVITINOV, L. G. and PISARENKO, V. F., 1987. *Deformation of Geophysical Environment and Seismic Process*. Moscow, USSR: Nauka Publ. (in Russian).
 38. PASECHNIK, N. P., 1970. *Characteristics of Seismic Waves from Nuclear Explosions and Earthquakes*. Moscow, USSR: Nauka Publ. (in Russian).
 39. IONOV, G. V., 2014. Evaluation the trajectory of Chelyabinsk bolide through the car DVR records and simulation of the fragment motion in the atmosphere. 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. 155–170 (in Russian).
 40. LANDAU, L. D. and LIFSHITZ, E. M., 1970. *Theory of Elasticity*. London; New York: Pergamon Press.
 41. 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).

42. LANGSTON, C. A., 2004. Seismic ground motions from a bolide shock wave. *J. Geophys. Res.* vol. 109, is. B12, id. B12309. DOI: 10.1029/2004JB003167
43. BRONSTEN, V. A., 1983. *Physics of Meteoric Phenomena*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publ. Co.

L. F. Chernogor

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

ATMOSPHERIC-SEISMIC EFFECT
OF CHELYABINSK METEOROID

Purpose: The parameters of the shock-wave source in the atmosphere and seismic oscillations that this source caused are investigated

Design/methodology/approach: The atmospheric and seismic processes caused by the passage and explosion of Chelyabinsk meteoroid on February 15, 2013 have been modelled. The model results are compared with the observation results obtained at several seismic stations.

Findings: The shock-wave impact duration is shown to be equal to approximately 97 s, and the time delays of the shock-wave at the sites of destruction relative to its generation time at altitudes of 23–53 km are shown to be equal to 77–295 s in the distance range interval of 23–84 km. The length of the area destructed by the shock with the access pressure of no less than 0.7 kPa is determined to be equal to 125–130 km, and its width to 16–60 km at various parts of the meteoroid path. The regression relation between the duration of the seismic signal and the length of the seismic wave path has been determined. The characteristic scale time of seismic source impact is equal to approximately 40 s. In the 20–50-s period range of seismic oscillations, the dependence of the group speed on period is established. The attenuation depth of seismic waves is estimated to be approximately 10–20 Mm in the frequency range of 0.25–3.0 Hz, and the Earth's crust speed to 5.7–7.0 μm/s.

Conclusions: The model and estimation results are in good agreement with the observations.

Key words: seismograms; seismic wave speed; trace length in the atmosphere; propagation time; destruction area parameters; seismic signal parameters; seismic signal duration, speed and atten-

uation rate; Earth's crust amplitude and wave motion; earthquake magnitude and energy

Л. Ф. Черногор

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

АТМОСФЕРНО-СЕЙСМІЧНИЙ ЕФЕКТ
ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРОІДУ

Предмет і мета роботи: Досліджено параметри ударно-хвильового джерела в атмосфері та викликаних ним сейсмічних коливань.

Методи та методологія: Виконано моделювання атмосферних та сейсмічних процесів, викликаних прольотом та вибухом Челябинського метеороїду 15 лютого 2013 р. Результати моделювання порівняно з результатами спостережень, виконаних низкою сейсмічних станцій.

Результати: Показано, що тривалість ударно-хвильового впливу була близькою до 97 с, час запізнення ударної хвилі в місцях руйнувань відносно моменту її генерації на висотах 23÷53 км складав 77÷295 с на віддаленнях 23÷84 км. Встановлено, що довжина зони руйнувань під дією ударної хвилі за надмірного тиску не менш ніж 0.7 кПа складала 125÷130 км, а її ширина на різних ділянках траєкторії метеороїду – 16÷60 км. Знайдено регресію для залежності тривалості сейсмічного сигналу від пройденої сейсмічною хвилею відстані. За результатами розрахунків та спостережень характерний час впливу сейсмічного джерела склав близько 40 с. Для сейсмічних коливань з періодом 20÷50 с встановлено залежність групової швидкості від періоду. За оцінками, глибина згасання сейсмічних хвиль з частотами 0.25÷3.0 Гц була близькою до 10÷20 Мм, а швидкість руху земної кори – 5.7÷7.0 мкм/с.

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

Ключові слова: сейсмограми; швидкість сейсмічних хвиль; довжина сліду в атмосфері; час поширення; параметри зони руйнувань; параметри сейсмічного сигналу; тривалість, швидкість та коефіцієнт згасання сейсмічного сигналу; амплітуда та швидкість хвильового руху земної кори; магнітуда та енергія землетрусу

Статья поступила в редакцию 13.12.2016