

О структуре инфразвукового сигнала Челябинского метеороида

А.Г. Сорокин,* И.Ю. Лобычева

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126

(Статья поступила 14.11.2014; Подписана в печать 08.12.2014)

В работе приводятся сведения о падении метеороида в районе Челябинска 15 февраля 2013 года. Описаны подобные инфразвуковые эффекты, зарегистрированные ранее и методы их интерпретации. Даются характеристики инфразвуковой установки ИСЗФ СО РАН, на которой зарегистрирован эффект взрыва метеороида в атмосфере. Приводится вид когерентного инфразвукового сигнала, обсуждаются его параметры.

PACS: 92.60.hh

УДК: 550.34.034

Ключевые слова: атмосфера, инфразвуковой сигнал, микробарограф, Челябинский метеороид.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время представление о космическом происхождении метеоритов, падающих на Землю не вызывает никакого сомнения. Хорошо известно, что на Землю каждые сутки падает несколько тонн метеорного вещества, и около 2 тысяч тонн ежегодно [1, 2]. Вместе с тем падение крупных метеоритов может представлять серьезную опасность, поскольку при достаточно больших размерах (около 50 м) энергия, выделяемая метеоритом при столкновении с земной атмосферой, может быть сопоставима с энергией атомного взрыва. Поэтому чрезвычайно важна любая информация о времени появления космического тела, его плотность и состав, возможные траектории его движения, характеристика его фрагментации.

1. ОБ ИССЛЕДОВАНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ МЕТЕОРОИДОВ В РОССИИ

Истекшее столетие было знаменательно событиями, связанными с вторжением в атмосферу Земли крупных космических тел — метеороидов. Наиболее значимым по атмосферным эффектам среди них, безусловно, является Тунгусский метеороид 1908 г. [3]. Акустическая волна взрыва метеорита в нижних слоях атмосферы несколько раз обогнула земной шар. Несмотря на то, что падение метеороидов приходится, в основном, на безлюдные районы, вероятность катастрофических последствий остается высокой.

Это обстоятельство, по-видимому, послужило одной из причин инициирования теоретических и поисковых исследований, как за рубежом, так и в России. Для примера и сравнения в табл. 1 приведены характерные параметры некоторых наиболее значимых метеороидов, отмеченных на территории России в 20-м и 21-м столетии. Здесь представлены космические тела в виде 2-х типов. Первый тип — это метеороид, при падении ко-

торого не обнаружено остатков вещества (Тунгусский метеороид). Второй тип — при падении, которого найдены остатки вещества. Сюда относится Челябинский метеороид. Приведенные данные показывают, что падение Челябинского метеороида относится к событию, сравнимому с энергией Тунгусского метеороида 1908 г.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ИСЗФ СО РАН

Инфразвуковая станция ИСЗФ СО РАН предназначена для мониторинга инфразвуковых сигналов в атмосфере и расположена в 150 км от г. Иркутска на территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.79N, 103.09E). Станция оснащена инфразвуковой аппаратурой ИСЗФ СО РАН, которая установлена в выносных павильонах с апертурой 500 м и представлена блоком инфразвукового микробарографа, разработанного в ИСЗФ СО РАН [4], устройством калибровки и системой шумоподавления в виде трубной линии длиной 60 м с 20-ю входными капиллярами. Инфразвуковая информация передается в центральный пункт для регистрации посредством кабельных линий. Основные характеристики инфразвуковых микробарографов с усилителем следующие: динамический диапазон 80 дБ; полоса частот 0.02–1 Гц; собственный шум 0,01 микробар; чувствительность 0.05в/микробар. На рис. 1 показана блок-схема инфразвуковой станции, используемой для мониторинга инфразвуковых сигналов в атмосфере.

Обозначения к рис. 1: ПИАФ1-ПИАФ3 — пространственные инфраакустические фильтры, микробарографы лепесткового типа разработаны в ИСЗФ СО РАН; передача сигнальной информации по кабелю: линия 1 — линия 3; АЦП — 12 разрядный дифференциальный аналого-цифровой преобразователь типа ЛА-1.5; калибратор — многочастотное устройство пистонфонного типа.

*E-mail: sor@iszf.irk.ru

Таблица I: Характеристики наиболее значимых метеоритов на территории России

Название события	Тунгусский метеороид	Сихоте-Алинский метеороид	Витимский болид	Челябинский метеороид
Дата и время события, UT	17(30).06.1908 0:14,5	12.02.1947 0:38	24.09.2002 16:50	15.02.2013 3:20
Высота взрыва, км	7–10	25	30	15–25
Масса, т	–	100	160	7000
Состав	–	94% железо	–	хондриты
Энергия, Мт ТНТ	50	0,01	0,2	до 0,5

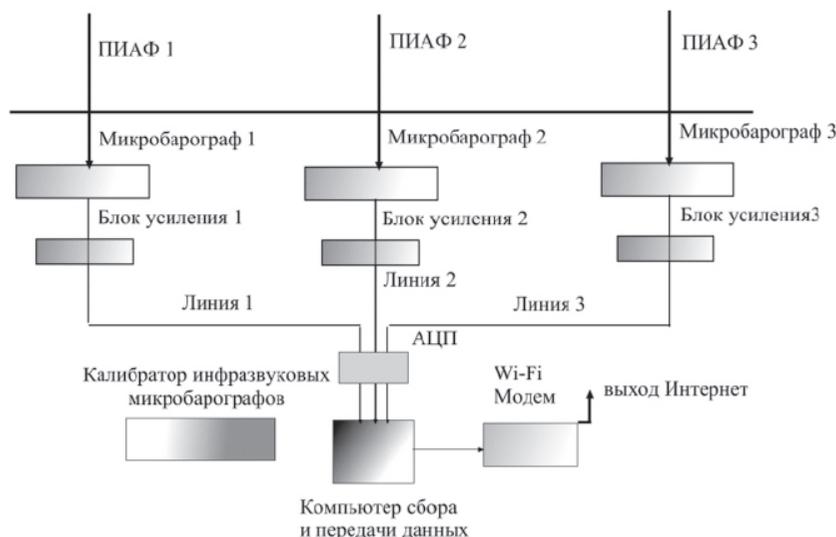


Рис. 1: Блок- схема инфразвуковой 3-х позиционной установки ИСЗФ СО РАН

3. АНАЛИЗ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА, СВЯЗАННОГО С ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

Атмосфера Земли является упругой средой, в которой легко возбуждаются и свободно распространяются акустические волны. Поэтому, 15 февраля 2013 г, в момент падения крупного небесного тела в районе г.Челябинска, наблюдался эффект излучения в инфразвуковом диапазоне частот. Инфразвуковой сигнал от Челябинского метеороида наблюдался на инфразвуковой станции Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН, расположенной в 150 км от Иркутска в 5 часов 51 минуту UT. Волна давления, возникшая от взрыва метеороида, по сообщению в прессе (NASA), образовалась в 3 часа 20 минут UT. При расстоянии от Челябинска до Иркутска равном 2780 км, характерное время распространения инфразвукового сигнала составило 2 часа 31 минуту. В структуре инфразвукового сигнала, зарегистрированный на станции ИСЗФ 15.02.2013 года явно выделяются три группы цуговых колебаний, из которых

наиболее продолжительным и мощным является первый (длительность около 650 с, размах амплитуды 15 микробар) (рис. 2).

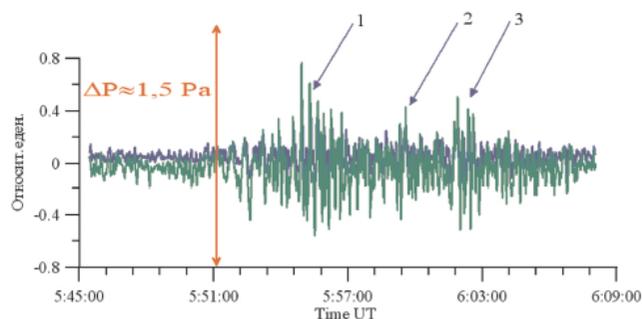


Рис. 2: Форма инфразвукового сигнала от Челябинского метеороида 15.02.2013 г, Стрелки указывают на последовательные цуги сигнала

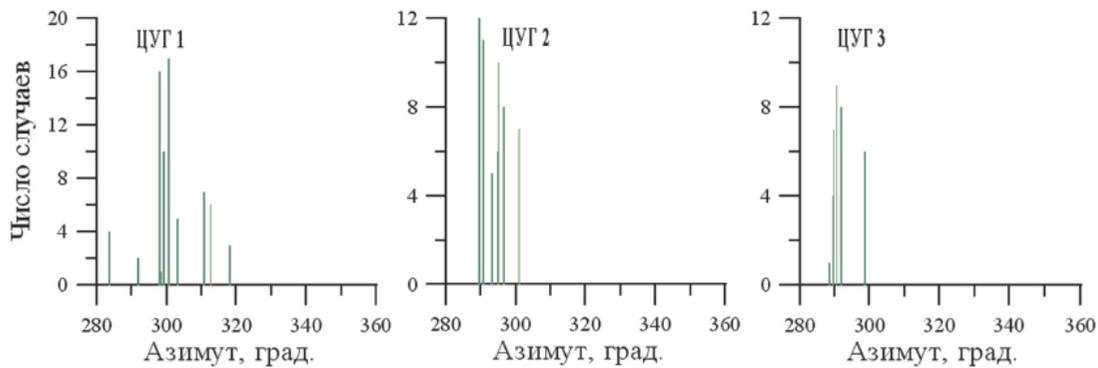


Рис. 3: Распределение азимута прихода инфразвукового сигнала в 3-х цугах

Первый цуг инфразвукового сигнала появился в 05:51 UT, как сигнал с устойчивым выделенным азимутом. Расчет азимута источника показал наличие вполне устойчивого источника инфразвукового излучения со средним значением около 300 градусов для 1-го цуга и 290 градусов для 2-го и 3-го цугов от направления на географический север. (рис. 3).

Последовательность цугов такова, что через 650–660 с от начала прихода, следует второй и еще через 150–200 с — третий цуг колебаний. Последующие цуги, имеют примерно в три раза меньшую продолжительность и в два раза меньший размах амплитуды, соответственно, около 200 с и 7 микробар. По этим данным построены динамические спектры колебаний для всех трех цугов и выделены доминирующие периоды колебаний в спектре колебаний первого цуга 32 и 16 с (рис. 4А-В).

Как показало событие Челябинского метеороида, еще приближающийся к поверхности Земли космический объект представляет большую опасность. Обладая огромной скоростью, космическое тело в атмосфере Земли возбуждает сильную ударную волну, которая за фронтом впереди тела развивает температуру в несколько тысяч градусов и давление в несколько тысяч атмосфер и способствует разрушению и испарению метеороида. Интересно выяснить, как структура инфразвукового сигнала связана с процессом вхождения метеороида в атмосферу и его фрагментации? Как следует из сообщений в прессе, в Челябинске взрывов от метеороида наблюдалось три [5]. Первый — как следствие разрушения основного тела метеороида на два фрагмента, и затем последующие, как разрушения этих двух фрагментов. Таким образом, структуру инфразвукового сигнала можно было бы объяснить с позиции процесса разрушения метеороида (рис. 5). С другой стороны, как показывает регистрограмма (рис. 2), временная последовательность амплитудных цугов инфразвукового сигнала, записанного на расстоянии почти 3000 км находится в той же последовательности что и взрывы, но имеет гораздо большую продолжительность. В то же время процесс пролета и разруше-

ния метеороида над Челябинском занимал около 60 с. Конечно, процесс разрушения метеороида, его торможение, а также последующие взрывы фрагментов происходили в неоднородной атмосфере. В этих условиях, вероятно, возбуждение многолучевой структуры инфразвукового сигнала, которая на станции регистрируется в виде цугов увеличенной продолжительности. На рис. 5 показана возможная схема процесса разрушения Челябинского метеороида, которая могла привести к последовательности из трех взрывов (также отмеченных в работе [5]) и вызвать соответствующую структуру инфразвукового сигнала. Для изучения связи фрагментации метеороида со структурой инфразвукового сигнала необходимы подробные данные о поле ветра и температуре по трассе пролета для дополнительного исследования.

Для оценки энергии взрыва метеороида логично использовать среднюю оценку. Так, в работе сотрудников СЕА (Франция) оценка средней энергии взрыва метеороида сделана по данным наблюдений около 20 станций Международной системы мониторинга (IMS) и составила около 460 кт ТНТ [6]. Для оценки энергии взрыва использовалось эмпирическое соотношение (1а, б) между периодом T акустических волн и энергией источника W для крупных взрывов [7].

$$\log(W/2) = 3,34 \log T - 2,58; \quad W/2 \leq 100 \text{ кт}; \quad (1a)$$

$$\log(W/2) = 4,14 \log T - 3,61; \quad W/2 \geq 40 \text{ кт} \quad (1b)$$

здесь T — период инфразвуковой волны максимальной амплитуды в секундах для двух диапазонов энергии, W — энергия взрыва в килотоннах ТНТ.

Аналогично, можно получить локальную оценку энергии взрыва метеороида по данным инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН из соотношения (1а, б) для диапазона периодов $T = 16\text{--}20$ с, (смотри рис. 4 панели А,В). Энергия взрыва Челябинского метеороида, в этом случае, составляет $W \sim 55\text{--}120$ кт ТНТ.

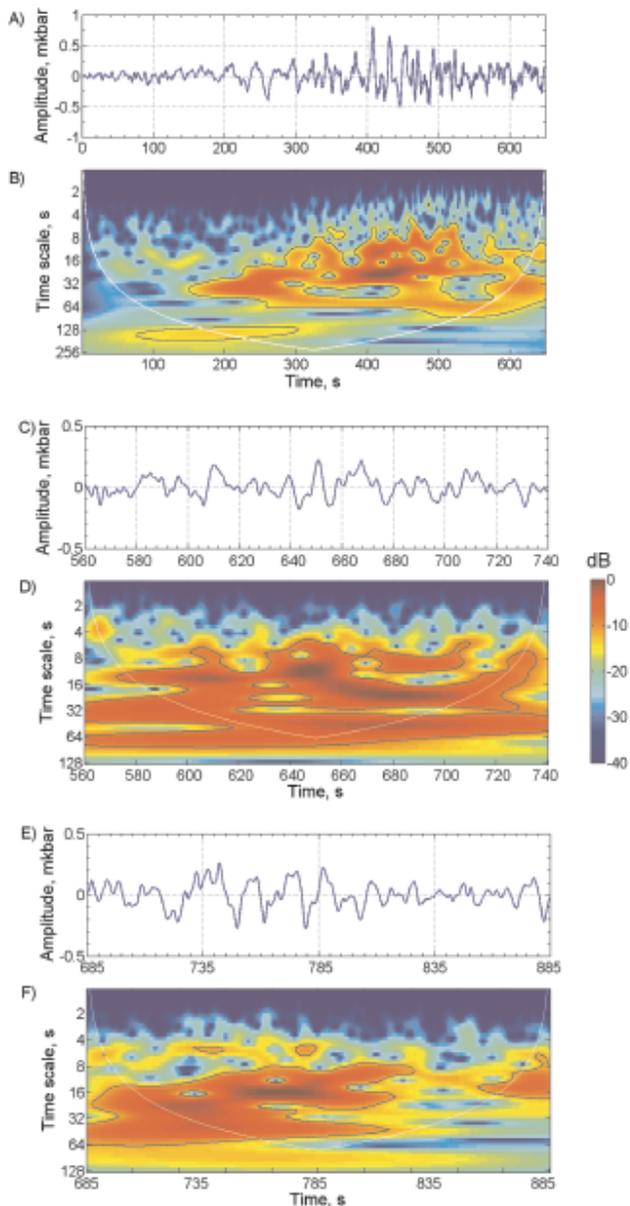


Рис. 4: Динамические спектры (панели B,D,F) 3-х последовательных цугов инфразвуковых сигналов (панели A,C,E), пришедших на станцию ИСЗФ СО РАН 15.02.2013г

Если учитывать период низкочастотных инфразвуковых колебаний с $T \sim 32$ с в начале сигнала, то энергия взрыва метеороида оценивается уже в 436 кт ТНТ. Эта оценка энергии близка полученной в работе Le Pichon et al., 2013 по данным Международной системы мониторинга [6]. Однако, как полагают авторы работы [8], эта оценка может быть завышена, поскольку данная модель плохо работает для больших периодов инфразвуковых волн, обычно наблюдаемых при взрыве крупных метеороидов. Кроме того, характер взрыва связан с сильной фрагментацией метеороида, поэтому область эффективной генерации может иметь гораз-

до большие пространственные масштабы и, возможно, связана с другими механизмами излучения низкочастотного инфразвука [9]. Второй и третий, менее мощные взрывы, наблюдались, как колебания в диапазоне 10–12 с и 16–18 с, соответственно (рис. 4 панели C,D и E,F). Энергия второго взрыва при $T \sim 10$ –12 с составила $\sim 6,5$ –14 кт ТНТ и третьего при $T \sim 16$ –18 с около 50–79 кт ТНТ. Заниженная амплитуда колебаний с $T \sim 32$ с в 1-ом цуге сигнала, связана со спадом амплитудно-частотной характеристики к области низких частот для микробарографов ИСЗФ.

В заключение сделаем несколько замечаний по форме инфразвукового сигнала первого цуга сигнала, показанной на верхней панели рис. 4. Видно, сигнал состоит из двух частей: вначале наблюдается низкочастотное вступление, а далее тело сигнала заполняют высокочастотные колебания. Попробуем объяснить структуру данного инфразвукового сигнала. Оказывается, взрывы, можно условно разделить на два вида: по типу взрывчатого вещества (ВВ).

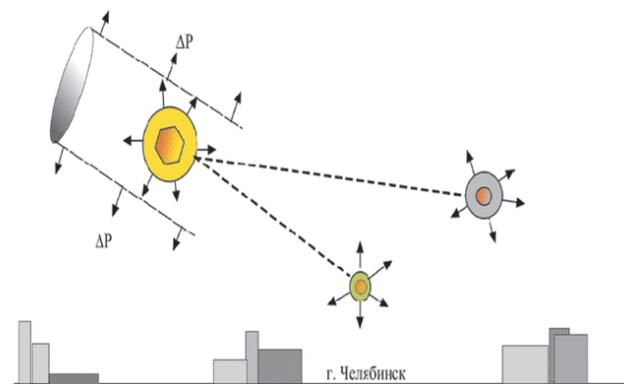


Рис. 5: Предполагаемая схема разрушения Челябинского метеороида 15.02.2013 г., соответствующая структуре инфразвукового сигнала в Иркутске

Мощности таких взрывов могут резко, на несколько порядков, отличаться по концентрации энергии на единицу массы ВВ. Концентрация энергии в первом случае достигает 4×10^{10} эрг/г, а во втором $8,4 \times 10^{17}$ эрг/г. При взрыве ВВ с малой концентрацией энергии образуется относительно большое количество горячих газообразных продуктов взрыва. При таком объеме продуктов взрыва можно считать, что в переходе в равновесное состояние участвует не атмосферный воздух, а только газообразные продукты взрыва. Тогда, размер образовавшегося при взрыве газового шара определяет период его собственных колебаний. В этом случае, отношение амплитуд двух последовательных колебаний характеризуют затухание процесса и энергию первого и вторичных колебаний, соответственно [10].

При взрыве с большой концентрацией энергии в малом объеме ($Q \approx 10^{18}$ эрг/г) участвует относительно малое количество вещества, поэтому в результате взрыва образуется малое количество продуктов взрыва, которым можно пренебречь при анализе процесса

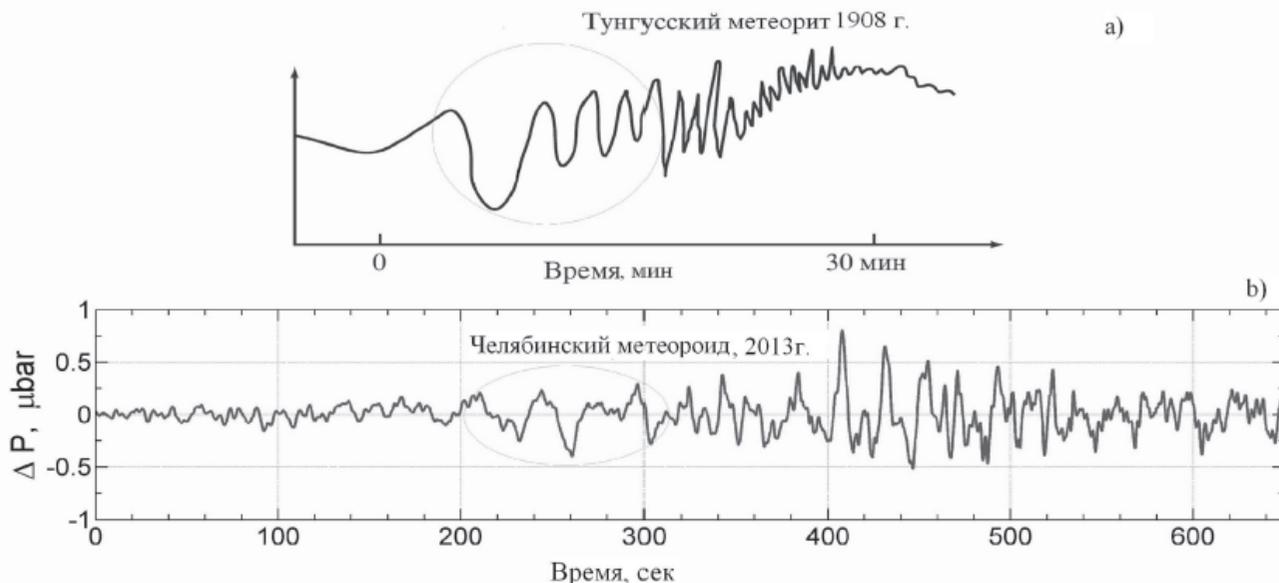


Рис. 6: Сравнение вида барограммы взрыва Тунгусского метеорита 1908 года, (а) и регистрограммы инфразвукового сигнала от взрыва Челябинского метеороида 2013 года, зарегистрированного в ИСЗФ СО РАН (Иркутск), (б)

установления состояния равновесия атмосферы после взрыва. Взрыв с высокой концентрацией энергии в малом объеме, например ядерный, можно рассматривать как точечный. В этом случае атмосфера, выведенная из равновесия мощным импульсом взрыва, возвращается к своему первоначальному состоянию аperiodически без вторичных колебаний [10]. Поэтому, следствием взрыва с большой концентрацией энергии является относительно короткий импульс давления и широкий спектр инфразвуковых частот. На рис. 6 показано сравнение барограммы взрыва Тунгусского метеорита 1908 г. и инфразвукового сигнала от взрыва Челябинского метеороида 2013 г.

Видно, что эти два сигнала имеют подобную структуру, и характеризуют сильные взрывы с высокой концентрацией энергии взрывчатого вещества.

Хорошо известно, что распространение взрывных волн в атмосфере характеризуют две особенности. Это поглощение высоких частот и дисперсия скорости. Наибольшей дисперсией обладают волны с периодом колебаний от 8–12 до 100 с [11]. Причем скорость волн с периодом от 8–12 до 30 с при увеличении периода колебаний уменьшается, а у волн с периодом от 30 до 100 с и более при увеличении периода скорость увеличивается [12]. Поэтому структура инфразвукового сигнала от взрыва с высокой концентрацией энергии на расстоянии в несколько тысяч километров такова, что впереди присутствует низкочастотный сигнал, связанный с первым коротким ударным импульсом. Затем развивается высокочастотный пульсирующий инфразвуковой «хвост», связанный с тепловой осцилляцией газообразного шара, стремящегося к равновесию.

- [1] Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Worden. S. P. Nature. **420**. P. 294. (2002).
- [2] Мезенин Н. А. Занимательно о железе. Глава «Железо в космосе». (М.: «Металлургия», 1972) 200 с.
- [3] Krinov Ye., L. Tunguskii meteorit. (Moscow–Leningrad: Academy of Science USSR, 1949) 191 с.
- [4] Ерущенков А.И., Пономарев Е.А., Турчанинов И.П. Прибор для регистрации инфраакустических и гравитационных атмосферных волн Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике солнца. Иркутск. Вып. 34. С. 50. (1974).
- [5] Емельяненко и др. Астрономический Вестник. **47**, № 4. С. 262. (2013).
- [6] Le Pichon A., et al. Geophysical Research Letters. (2013). (in print).

- [7] ReVelle, D.O. Annals of the New York Academy of Sciences. **822**. P. 284. (1997). URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-6632-1997.tb48347.xS>.
- [8] Алпатов В.В., Бузов В.Н., Вагин Ю.П., Галкин К.А., Гвишвили Г.В., Глухов Я.В., Давиденко Д.В., Зубачев Д.С., Иванов В.Н., Кархов А.Н., Коршунов В.А., Лапшин В.Б., Лещенко Л.Н., Лысенко Д.А., Минлигареев В.Т., Морозова М.А., Перминова Е.С., Портнягин Ю.И.З., 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 февраля 2013 года. Гелиогеофизические исследования (электронный журнал) <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=180>

- [9] *Edwards W.N., Brown P. G., Revelle D.O.* Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics **68**, P.1136. (2006)
- [10] *Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И.* Физика взрыва. (М.: Физматгиз, 1959). 801 с.
- [11] *Золотов А.В.* Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. (Минск: Наука и техника, 1966). 202 с.
- [12] *Пасечник И.П.* «Природа». №7. (1962).

On the structure infrasound signal emitted by the Chelaybinsk meteoroid

A. G. Sorokin^a, I. Yu. Lobycheva^b

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126a Lermontov st., Irkutsk 664033, Russia

E-mail: ^asor@iszf.irk.ru, ^bloir@iszf.irk.ru

The paper presents information about the Chelyabinsk meteoroid impact on February 15, 2013. Described here are similar infrasound effects, recorded earlier, and the methods of their interpretation. The paper also gives characteristics of the ISTP SB RAS infrasound installation which recorded the effect of the meteor's explosion in the atmosphere. Besides, we present the coherent infrasound signal and discuss its parameters.

PACS: 92.60.hh

Keywords: atmosphere, infrasound signal, microbarograph, Chelaybinsk meteoroid.

Received 14.11.2014.

Сведения об авторах

1. Сорокин Александр Григорьевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел: 8 (3952) 42-82-65, e-mail: sor@iszf.irk.ru.
2. Лобычева Ирина Юрьевна — младший научный сотрудник; тел: 8(3952) 42-82-65, e-mail: loir@iszf.irk.ru.