

УДК 551.596.1

ИНФРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ И ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА БЕРИНГОВОМОРСКОГО МЕТЕОРОИДА 19 ДЕКАБРЯ 2018 г.

Академик РАН Е. И. Гордеев¹, С. Н. Куличков², П. П. Фирстов^{3,*},
О. Е. Попов², И. П. Чунчuzов², Д. И. Будилоv³, Д. В. Чебров³

Поступило 12.07.2019 г.

18 декабря 2018 г. в 23:48 UTC при входе в земную атмосферу на высоте в 25,6 км над уровнем Берингова моря взорвался метеороид. Рассчитанная масса Берингоморского метеороида составляла 1600 т, а его диаметр 9–14 м. Если расчёты верны, то за последние 30 лет этот взрыв по своей энергии был вторым после взрыва Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г. Обсуждаются результаты анализа инфразвукового сигнала, зарегистрированного международной системой инфразвукового мониторинга IS44.

Ключевые слова: Берингоморский метеороид, оценка энергии взрыва.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524894409-413>

18 марта 2019 г. BBC (British Broadcasting Corporation) со ссылкой на NASA (National Aeronautics and Space Administration) сообщила, что 18 декабря 2018 г. в 23:48 UTC в атмосферу Земли со скоростью 32 км/с под небольшим углом (7° к вертикали) вошёл метеороид [1]. На высоте 25,6 км над Беринговым морем в точке с координатами $\varphi = 56,9^\circ$ с.ш. и $\lambda = 172,4^\circ$ в.д. произошло его разрушение с образованием ударной волны (рис. 1).

Инфразвуковые станции, входящие в состав международной системы мониторинга (IMS) в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), зафиксировали инфразвуковой сигнал (ИС) от разрушения метеороида (Берингоморский метеороид), сопровождавшегося возникновением ударной волны [2]. По ИС IS18 (инфразвуковая станция), находящейся в Гренландии, энергия взрыва была оценена в 173 кт тринитротолуола (ТНТ), что в 10 раз превышает энергию взрыва атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму. Исходя из энергии и скорости вхождения в атмосферу масса Берингоморского метеороида оценивается в 1600 т, а диаметр 9–14 м [1, 3].

Если оценка верна, то за последние 30 лет это был второй по энергии после Челябинского метеороида

15 февраля 2013 г. [4, 5] взрыв космического тела в земной атмосфере.

На п-ове Камчатка на расстоянии 1024 км находится ближайшая к эпицентру взрыва метеороида инфразвуковая станция IS44 международной системы инфразвукового мониторинга (IMS). Группа из четырёх инфразвуковых приёмников-микробарографов MB2000 станции IS44 с расстояниями между приёмниками от 0,94 до 1,8 км (рис. 1) позволяет надёжно определять азимут на источник ИС. Каждый микробарограф оснащён пространственно-акустическим фильтром, значительно повышающим отношение сигнал/шум в диапазоне инфразвуковых частот 0,03–10 Гц.

В настоящей работе сделан анализ инфразвукового сигнала, зарегистрированного IS44, и проведена оценка энергии этого события.

На рис. 2а приведён фрагмент записи ИС Берингоморского метеороида на микробарографе Н1 (рис. 1, левая панель) IS44, отфильтрованного в полосе 0,3–1,4 Гц. Данная полоса частот обеспечила надёжное выделение сигнала и определение азимута на источник и фазовой скорости, которые вычислялись стандартным методом определения временных задержек между парами микробарографов с помощью взаимно-корреляционного анализа.

Как видно на рис. 2б, в, значения азимута и скорости при большом разбросе на интервале длительностью 2500 с имеют упорядоченные значения только 19 декабря 2018 г. с 00:47:50 до 00:53:30, что свидетельствует об одном источнике ИС. Интервал определённых азимутов на источник инфразвуковых волн очень хорошо согласуется с азимутом $59,9^\circ$,

¹ Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии наук, Москва

³ Камчатский филиал Федерального исследовательского
центра “Единая геофизическая служба РАН”,
Петропавловск-Камчатский

*E-mail: fristov@emsd.ru

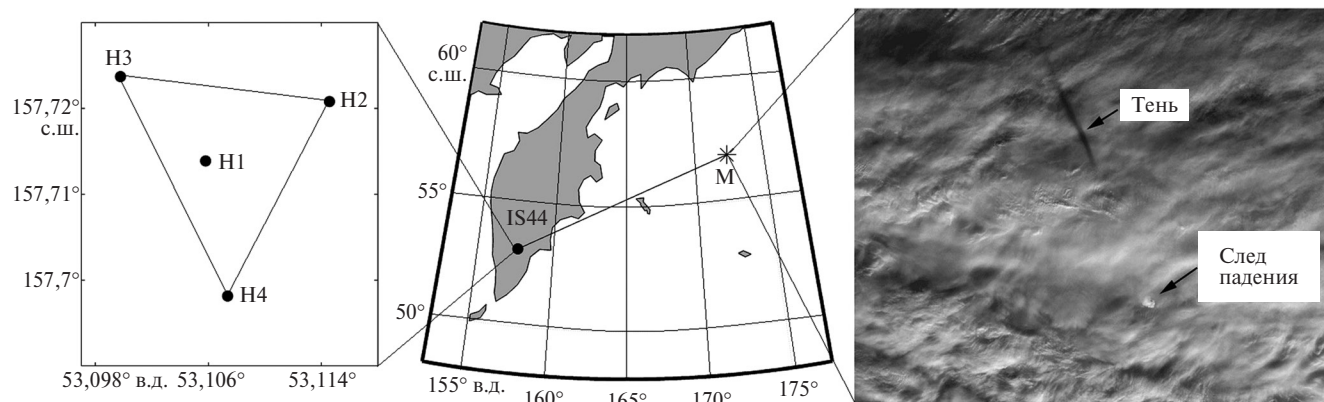


Рис. 1. Схема расположения эпицентра взрыва метеорного тела, инфразвуковой станции IS44 на Камчатке, микробарографов в группе и снимок со спутника TERRA 19.12.2018 г. в 23:54*, полученный спектро радиометром MISR (Multi-angle Imaging Spectro Radiometer).

* Здесь и далее — время UTC.

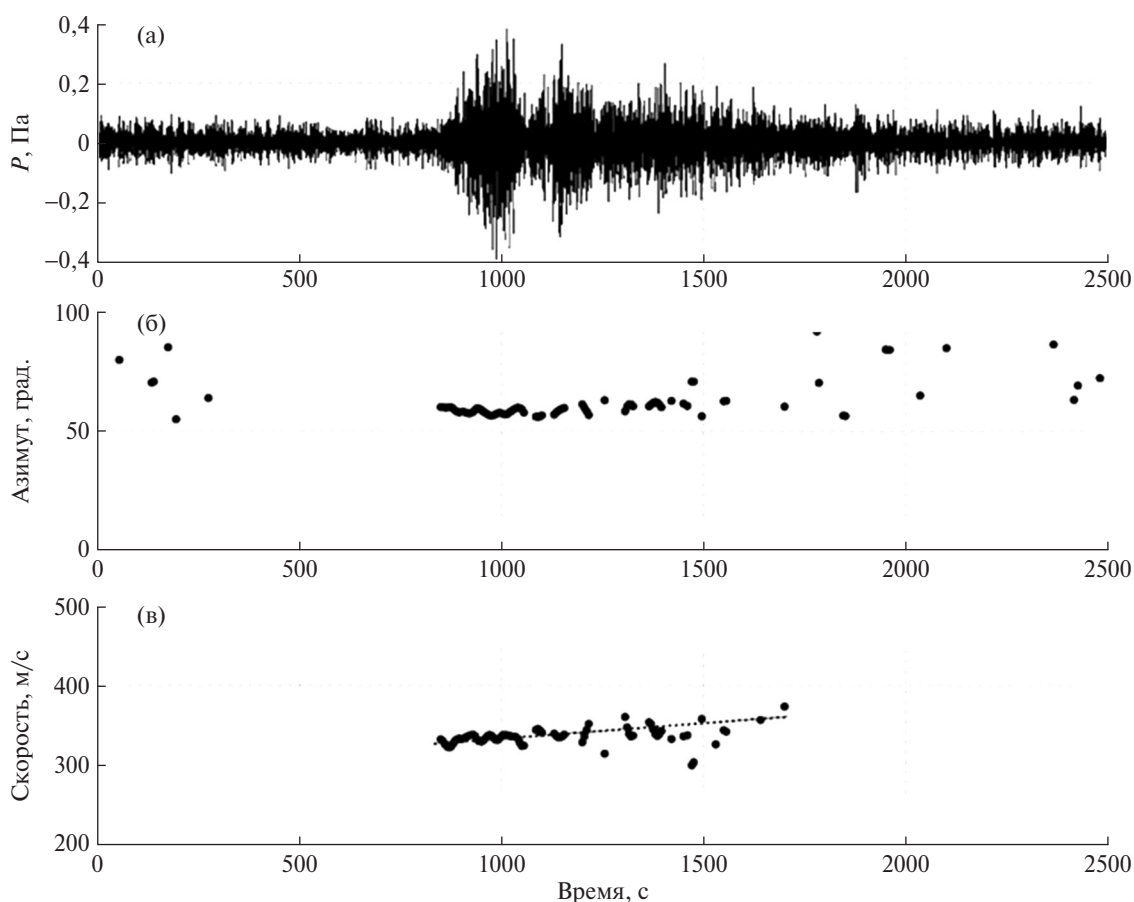


Рис. 2. Фрагмент инфразвукового сигнала, отфильтрованного в полосе 0,3–1,4 Гц, зарегистрированного микробарографом H1 станции IS44 (а), азимут прихода ИС (б), кажущаяся скорость (в). Начало отсчёта времени соответствует 19 декабря 2019 г. 00:33:17.15.

вычисленным по координатам IS44 и эпицентра разрушения Берингоморского метеороида [1, 3]. При этом максимальная скорость прихода ИС составляет ~290, а минимальная 240 м/с.

Кажущаяся скорость распространения звуковой волны (рис. 2в) между приёмниками IS44 изменяется от 310 до 360 м/с, что указывает на увеличение угла скольжения, соответствующего приходу волн, от-

ражённых от различных высот в атмосфере (чем больше высота отражения, тем больше кажущаяся скорость).

Для оценки энергии эквивалентного взрыва в ТНТ (Q) в воздухе, от которого на расстоянии 1024 км наблюдались бы инфразвуковые сигналы, имеющие зарегистрированные амплитуды и характерные частоты (рис. 2), воспользуемся используемыми в литературе эмпирическими зависимостями между энергией эквивалентного взрыва Q и характерными частотами (периодами) ИС [5–8].

Одним из таких соотношений является выражение (1), в котором получено полуэмпирическое соотношение между тротиловым эквивалентом и наблюдаемыми характерными частотами (периодами) ИС [5, 7]:

$$\lg(Q/2) = 3,34 \lg T - 2,58 \text{ для } Q < 200 \text{ кт.} \quad (1)$$

Вполне вероятно, что именно на основе этого соотношения и получены оценки для энергии взрыва в 173 кт ТНТ по данным регистрации инфразвукового сигнала на станции IS18 в Гренландии [2].

Другим соотношением является выражение (2), в котором дополнительно учитывается не только характерная частота регистрируемого сигнала f , но и расстояние R между местом взрыва и пунктом регистрации инфразвукового сигнала от метеороида [5]:

$$\lg Q \approx a - b \lg f - c \lg R + d, \quad (2)$$

где f — частота в Гц, R — расстояние в км; $a \approx 0,65$; $b \approx 2,3$; $c \approx 0,49$; $d \approx -0,17$.

Существенным недостатком соотношений типа (1), (2) является то, что в них не учитывается в явной форме влияние атмосферы на распространение ИС. На наш взгляд, учёт в [5, 7, 8] подобного влияния, основанный только на результатах эмпирических регистраций инфразвука от ядерных и химических взрывов в воздухе, недостаточен для получения физически обоснованных соотношений между энергией взрыва метеороида и доминантным периодом генерируемой при этом им инфразвуковой волны, поскольку амплитуда инфразвукового сигнала p и доминантный период T (частота f) существенно зависят от проявления нелинейных эффектов при распространении инфразвука.

Действительно из-за уменьшения плотности воздуха на восходящем участке амплитуда колебательной скорости возрастает, что приводит к нелинейным искажениям исходного биполярного импульса от взрыва. В итоге на расстояниях, когда влияние

нелинейных эффектов становится преобладающим, импульс трансформируется в N -волну с амплитудой p и длительностью τ отдельных фаз [9], которые уже не зависят от своих начальных значений, а определяются значением площади волнового профиля S_0 положительной/отрицательной фазы исходного биполярного импульса $S_0 = \int_0^{\tau_0} p dt$, умноженным на расстояние до источника R_0 . При этом $S_0 \times R_0 \sim S \times R$ [9].

На этом основании в [5, 10] предложено использовать соотношение (3) между тротиловым эквивалентом и регистрируемыми значениями величины I на больших удалениях от источника:

$$Q_I [\text{кг}] = 1,38 \cdot 10^{-10} (S \times R [\text{кг}/\text{с}])^{1,482}. \quad (3)$$

Для оценки тротилового эквивалента были выбраны три наиболее интенсивных фрагмента в зарегистрированном ИС на станции IS44 (рис. 3). Вычислялось среднее значение сигналов микрографиков Н1, Н2 и Н4 (на Н3 — большой шум) с учётом задержек на азимут метеороида 59° , что позволило улучшить отношения сигнал/шум.

Результаты оценки энергии взрыва Берингоморского метеороида, полученные с использованием формул (1)–(3) по данным регистрации ИС на IS44 на расстоянии 1024 км от предполагаемого эпицентра взрыва, приведены в табл. 1. Из неё следует, что расчётные значения тротилового эквивалента взрыва Берингоморского метеороида заключены в пределах 0,4–8,2 кт, что существенно меньше значения 173 кт ТНТ, приведённого в работе [3].

Однако следует учитывать, что в отличие от точечных взрывных источников инфразвука метеороид, движущийся с большой скоростью, излучает ударную волну на достаточно протяжённом участке траектории полёта длиной в десятки километров, что много больше длин волн инфразвука в широком диапазоне частот. В результате инфразвук излучается как бы линейной антенной, что порождает направленность излучения инфразвука. В работе [11] обсуждается направленность излучения ударной волны

Таблица 1. Расчёт тротилового эквивалента по наиболее сильным приходам ИС Берингоморского метеороида

19 декабря 2018 г.	$2I$, Па·с	f , Гц	Расчёт тротилового эквивалента по различным эмпирическим зависимостям, кт		
			(1) $Q(T)$	(2) $Q(f, R)$	(3) $Q(I, R)$
00:49:52	2,34	0,15	3,10	8,20	0,39
00:50:11	2,13	0,19	1,40	4,72	0,34
00:52:15	3,04	0,17	1,92	5,87	0,58

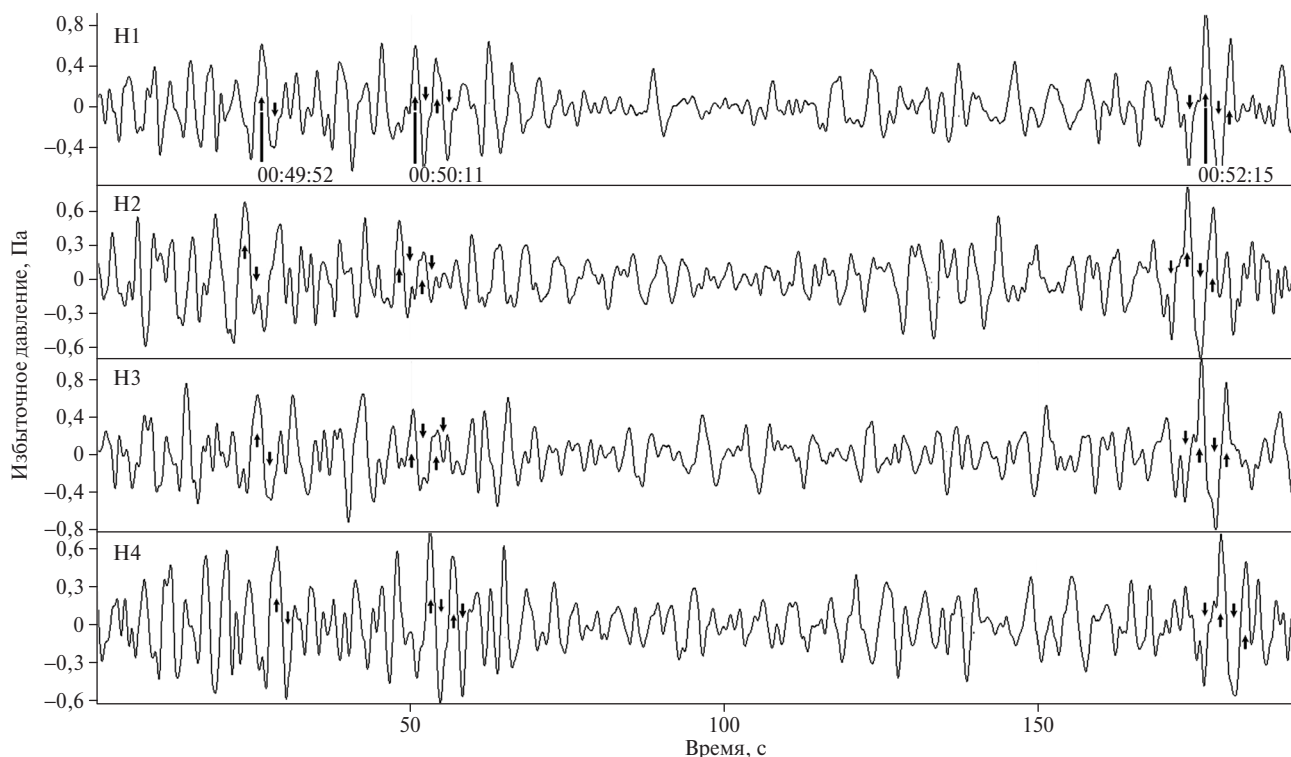


Рис. 3. Фрагмент инфразвукового сигнала, отфильтрованного в полосе 0,17–1,0 Гц от Берингоморского метеороида на IS44 с отметкой наиболее сильных импульсов. Начало отсчёта времени соответствует 19 декабря 2019 г. 00:49:25.

Челябинским метеороидом, которая ярко проявилась в наблюдаемых разрушениях на земной поверхности.

Для Берингоморского метеороида, по-видимому, также была характерна направленность излучения инфразвука. При этом азимутальная зависимость уровней инфразвука будет также определяться и угловыми характеристиками траектории движения метеороида. Это наряду с условиями распространения может приводить к значительным вариациям уровня инфразвука, регистрируемого различными инфразвуковыми станциями, а значит, и к вариациям оценок тротилового эквивалента. В дальнейшем будет реализован именно такой подход.

Источники финансирования. Работа выполнялась в рамках государственных заданий по проектам АААА–А18–118021290156–8, АААА–А19–119031590060–3 и при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 18–05–00576, 18–55–05002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rincon P. // BBC News website. 2018. <https://www.bbc.com/news/science-environment-47607696>
2. Brown P. // <https://twitter.com/pgbrown/status/1104166976438657030>
3. Redd N. // EOS Earth & Space Science News. 2019. doi.org/10.1029/2019EO119503
4. Popova O.P., Jenniskenas P., Emel'yanenko V., et al. // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.
5. Куличков С.Н., Попов О.Е., Авиллов К.В., Чунчузов И.П. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 344–356. DOI: 10.7868/S0003351518030108.
6. Pichon A.L., Ceranna L., Pilger C., et al. // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 1–6. DOI: 10.1002/grl.50619.
7. ReVelle D.O. // Ann. N.Y. Acad. Sci. 2006. 822. P. 284–302. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1997.tb48347.x.
8. Ens T.A., Brown P.G., Edwards W.N., Silber E.A. // J. Atmosph. and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 80. P. 208–229.
9. Буш Г.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н., Педанов М.В. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 11. С. 1164–1172.
10. Куличков С.Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 5. С. 658–664.
11. Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П. // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. М.: ГЕОС, 2014. 160 с.

INFRASONIC WAVES AND ASSESSMENT OF ENERGY OF EXPLOSION OF BERINGOVOMORSKY METEOROID ON DECEMBER 19, 2018

Academician of the RAS **E. I. Gordeev**¹, **S. N. Kulichkov**², **P. P. Firstov**³,
O. E. Popov², **I. P. Chunchuzov**², **D. I. Budilov**³, **D. V. Chebrov**³

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

²*Institute of the Physics of Atmosphere, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

³*Kamchatka Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

Received July 12, 2019

On December 18, 2018 at 23:48 UTC in the Earth's atmosphere, at the height of 25,6 km over the Bering sea, destruction of a meteoroid with formation of a shockwave occurred. The mass of the Beringovomorsky meteoroid is estimated as 1600 tons, and its diameter is estimated as 9–14 meters. If assessment is right, then for the last 30 years it was the second in energy explosion of a space body in the Earth's atmosphere. The nearest to the epicenter of meteoroid explosion station of the international system of infrasonic monitoring (IS44 station) is located on the Kamchatka peninsula at a distance of 1024 km. At IS44 station an infrasonic signal from destruction of a meteoroid was registered. In this paper the results of analysis of the infrasonic signal registered by IS44 are represented and the estimation of energy of this event is carried out.

Keywords: Beringomorsky meteoroid, assessment of explosion energy.