

УДК 550. 388

## ЗАВИСИМОСТЬ АМПЛИТУДЫ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА, СГЕНЕРИРОВАННОГО ВЗРЫВОМ МОЩНОГО ВУЛКАНА, ОТ РАССТОЯНИЯ

**Л. Ф. Черногор, Н. Б. Шевелев**

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, факультет радиофизики, биомедицинской  
электроники и компьютерных систем, пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина*

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

По данным 13 инфразвуковых станций (всего 15 трасс распространения), удаленных примерно на 0.9 – 39 Мм от эпицентра взрыва мегатонного класса вулкана St. Helens, имевшего место 18 мая 1980 г., построены регрессионные зависимости амплитуды давления во взрывной волне от расстояния между эпицентром взрыва и инфразвуковой станцией. Регрессии построены для случаев сферической расходимости фронта волны, цилиндрической расходимости фронта волны и цилиндрической расходимости фронта волны с учетом ее затухания и «высвечивания» из волновода. Показано, что последний случай является предпочтительным.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** извержение вулкана, инфразвук, сферическая расходимость фронта волны, цилиндрическая расходимость фронта волны, аппроксимация, регрессия, затухание волны

За даними 13 інфра звукових станцій (всього 15 трас поширення), віддалених приблизно на 0.9 – 39 Мм від епіцентру вибуху мегатонного класу вулкана St. Helens, що мав місце 18 травня 1980 р., побудовано регресійні залежності амплітуди тиску у вибуховій хвилі від відстані між епіцентром вибуху та інфра звуковою станцією. Регресії побудовано для випадків сферичної розбіжності фронту хвилі, циліндричної розбіжності фронту хвилі та циліндричної розбіжності фронту хвилі з урахуванням її загасання та «висвічування» із хвилеводу. Показано, що останній випадок є найбільш прийнятним.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** виверження вулкану, інфра звук, сферична розбіжність фронту хвилі, циліндрична розбіжність фронту хвилі, апроксимація, регресія, загасання хвилі

A multiple linear regression analysis has been performed to fit the pressure amplitude in the shock wave from the megaton of TNT St. Helens volcano explosion on May 18, 1980 and the distance between the explosion epicenter and thirteen 0.9–39 Mm distant infrasound stations over altogether 15 propagation paths. Multiple linear regression fits are constructed for the cases of a spherical wave-front spreading, a cylindrical wave-front spreading, and a cylindrical wave front spreading taking into account the wave attenuation and the infrasonic radiation through the waveguide wall. The latter case has been shown to be preferable.

**KEY WORDS:** volcano eruption, infrasound, spherical wave-front spreading, cylindrical wave-front spreading, fit, regression, wave attenuation

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование зависимости параметров инфразвуковых волн от условий на трассе распространения является важной прямой радиофизической задачей. Без ее решения невозможно решение обратной радиофизической задачи, сводящейся к нахождению параметров источника инфразвука по характеристикам инфразвуковой волны.

Важнейшей особенностью инфразвуковых волн, позволяющей успешное решение обратной радиофизической задачи, является их способность распространяться в глобальных масштабах практически без затухания [1].

Источниками инфразвуковых волн являются многие природные и техногенные процессы [1, 2]. К природным источникам относятся падение метеороидов, вариации космической погоды, грозы, погодные фронты, извержение вулканов, землетрясения и ряд других [3 – 7]. Техногенными источниками инфразвуковых сигналов являются полеты ракет и самолетов, мощные взрывы, высокоэнергетические технологические процессы и ряд других [8 – 17].

Цель настоящей работы – построение регрессий, описывающих зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной в процессе взрыва вулкана St. Helens, от расстояния.

### СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Для построения регрессий использовались результаты регистрации амплитуд инфразвуковых сигналов, представленные в работе [7]. Для дальнейшего анализа использовались данные, полученные на удалении  $r \approx 0.9 – 39$  Мм от эпицентра взрыва (таблица). Из таблицы видно, что амплитуда сигнала изменялась от 25 до 1.5 Па. Большинство станций было удалено на расстояние  $r \approx 8$  Мм.

Таблица. Общие сведения об инфразвуковых станциях, зарегистрировавших инфразвуковой сигнал от извержения вулкана St. Helens (по материалам работы [7])

Местоположение станции	Широта	Долгота	Расстояние, Мм	Амплитуда, Па
Berkeley, CA	37.9°N	122.3°W	0.925	17.5
Boulder, CO	40.0°N	105.2°W	1.530	25
Washington, DC	39.0°N	77.1°W	3.700	10.5
Palisades, NY	41.4°N	73.9°W	3.950	10
Honolulu, HI	21.3°N	157.6°W	4.156	8.5
Kushiro, Japan	43.0°N	144.4°E	6.945	7
Akita, Japan	39.7°N	140.1°E	7.453	1.5
Tokyo, Japan	35.7°N	139.8°E	7.778	5
Wajima, Japan	37.4°N	136.9°E	7.833	5.5
DeBilt, Netherlands	52.2°N	5.3°E	7.982	20
Hamburg, FRG	53.5°N	10.1°E	8.000	7.1
Buchholz, FRG	53.4°N	9.9°E	8.010	7.35
Tonago, Japan	35.4°N	133.4°E	8.211	5.5
DeBilt, Netherlands	52.2°N	5.3°E	32.049	1.5
Berkeley, CA	37.9°N	122.3°W	39.106	6.5

### РЕГРЕССИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Предположим вначале, что сгенерированная взрывом вулкана волна сферического типа. Тогда регрессионная зависимость имеет вид:  $\Delta p = a/r + b$ . Результаты аппроксимации данных наблюдения представлены на рис. 1. Регрессия имеет вид:

$$\Delta p = 26.18r^{-1}, \quad R \approx 0.26, \quad \sigma \approx 6.43, \quad (1)$$

$$\Delta p = 16.21r^{-1} + 5.35, \quad R \approx 0.67, \quad \sigma \approx 5.12. \quad (2)$$

Здесь  $R$  – коэффициент достоверности аппроксимации,  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение регрессии.

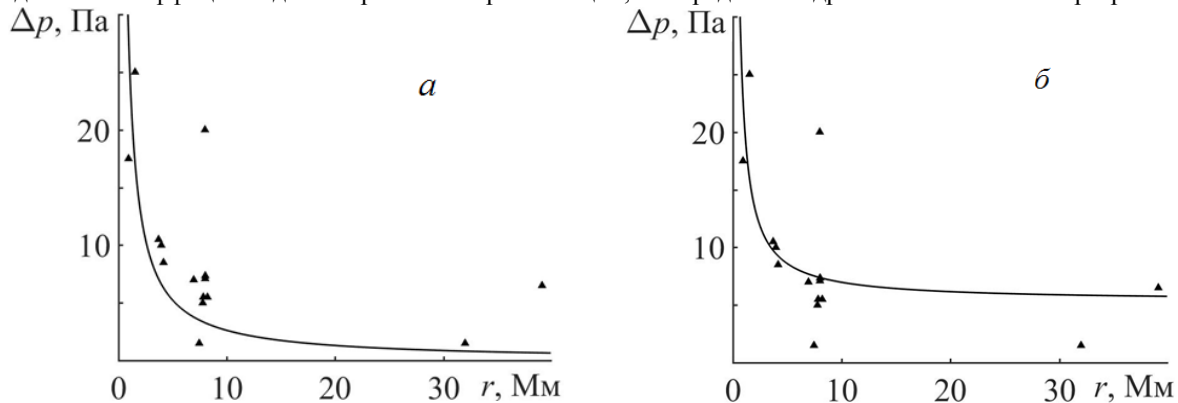


Рис. 1. Зависимость амплитуды волны давления, сгенерированной извержением вулкана St. Helens, от расстояния между эпицентром и микробарографом. Зависимость построена по  $N = 15$  трассам:  $a$  – аппроксимация степенным законом  $\Delta p = 26.18r^{-1}$ , коэффициент достоверности аппроксимации  $R \approx 0.26$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma \approx 6.43$ ;  $b$  –  $\Delta p = 16.21r^{-1} + 5.35$ ,  $R \approx 0.67$ ,  $\sigma \approx 5.12$ .

В случае цилиндрической расходимости фронта волны регрессионная зависимость имеет вид:  $\Delta p = ar^{-0.5} + b$ . Уравнения регрессий принимают вид (рис. 2):

$$\Delta p = 21.03r^{-0.5}, \quad R \approx 0.70, \quad \sigma \approx 4.73, \quad (3)$$

$$\Delta p = 20.87r^{-0.5} + 0.09, \quad R \approx 0.70, \quad \sigma \approx 4.90. \quad (4)$$

Если к цилиндрической расходимости фронта волны прибавить затухание, то результаты аппроксимации приобретают вид, показанный на рис. 3. Соответствующая регрессионная зависимость имеет вид:

$$\Delta p = 21.46r^{-0.5}e^{-0.054r} + 1.35, \quad R \approx 0.89, \quad \sigma \approx 3.19. \quad (5)$$

На рис. 4 показаны результаты аппроксимации следующими зависимостями:

$$\Delta p = 21.05r^{-0.536}, \quad R \approx 0.86, \quad \sigma \approx 3.21, \quad (6)$$

$$\Delta p = 21.33r^{-0.562}, \quad R \approx 0.88, \quad \sigma \approx 3.17. \quad (7)$$

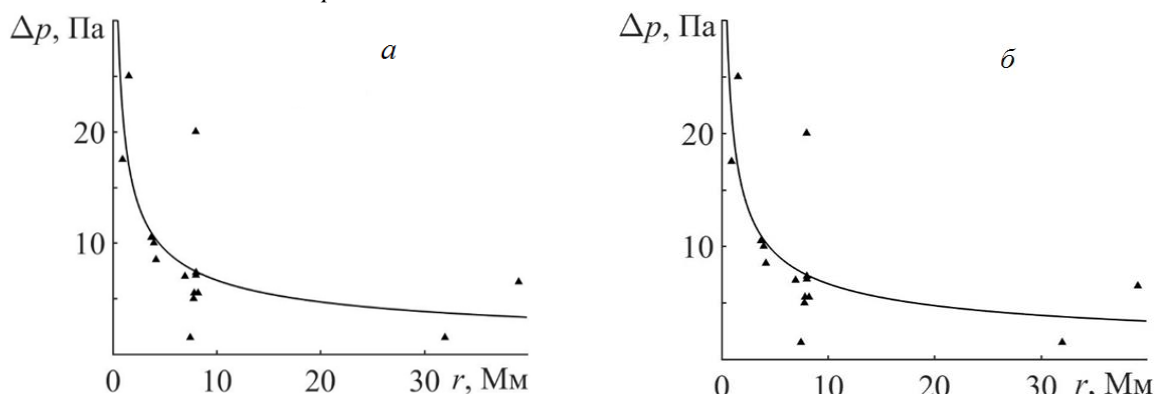


Рис. 2. Зависимость амплитуды волны давления, сгенерированной извержением вулкана St. Helens, от расстояния между эпицентром и микробарографом. Зависимость построена по  $N = 15$  трассам:  $a$  – аппроксимация степенным законом:  $\Delta p = 21.03r^{-0.5}$ ,  $R \approx 0.70$ ,  $\sigma \approx 4.73$ ;  $b$  –  $\Delta p = 20.87r^{-0.5} + 0.09$ ,  $R \approx 0.70$ ,  $\sigma \approx 4.90$ .

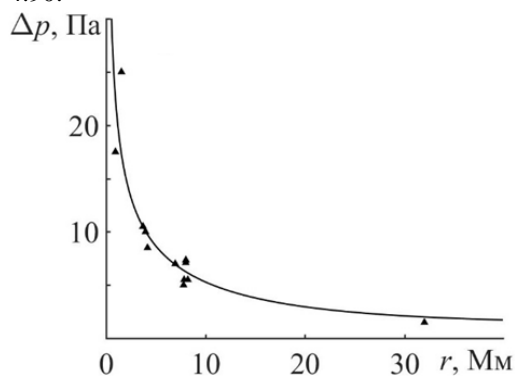


Рис. 3. Зависимость амплитуды волны давления, сгенерированной извержением вулкана St. Helens, от расстояния между эпицентром и микробарографом. Зависимость построена по  $N = 12$  трассам. Опущены данные станций Akita, Japan (7.453, 1.5), DeBilt, Netherlands (7.982, 20) и Berkeley, CA (39.11, 6.5). Аппроксимация экспоненциально-степенным законом:

$$\Delta p = 21.46r^{-0.5}e^{-0.05r} + 1.35, \quad R \approx 0.89, \quad \sigma \approx 3.19.$$

## ОБСУЖДЕНИЕ

Регрессия (1) не может считаться приемлемой, потому что значение  $R \approx 0.26$  – слишком малое. Для регрессии (2) значение  $R \approx 0.67$  – значительно больше. Однако, и эта регрессия не является удовлетворительной, потому что не выполняется очевидное требование  $\Delta p(\infty) = 0$ . Таким образом, следует признать, что на достаточно больших ( $r \geq 1$  Мм) удалениях от эпицентра инфразвуковая волна не была сферической. Регрессии (3) и (4) имеют близкие значения как  $R$ , так и  $\sigma$ . Тем не менее, регрессию (4) следует отвергнуть по той причине, что  $\Delta p(\infty) \neq 0$ . Наибольшим значением  $R \approx 0.89$  и наименьшим значением  $\sigma \approx 3.19$  обладает регрессия (5). Она описывает распространение инфразвуковой волны в волноводе «земля – стратосфера» (а также отчасти в волноводе «земля – термосфера») при наличии в нем затухания. Затухание не может быть связано с молекулярным поглощением и рассеянием инфразвука турбулентных неоднородностях атмосферы. Скорее всего, оно обусловлено «высвечиванием» части энергии из волновода. Коэффициент затухания, как следует из данных аппроксимации, близок к  $0.054 \text{ Мм}^{-1}$ , а глубина затухания близка к 18.4 Мм. Значение коэффициента затухания получено по измерениям на одной станции и, поэтому, требуется его уточнение. К сожалению, эта регрессия не справедлива при  $r \rightarrow \infty$ . Более предпочтительными являются регрессии (6) и (8). Дополнительное по сравнению с регрессиями (1) и (4) ослабление волны, по-видимому, связано с «высвечиванием» части энергии из волновода.

## ВЫВОДЫ

1. Для различных моделей расходимости фронта волны построены регрессии, аппроксимирующие данные наблюдений.

2. Правдоподобной оказалась модель распространения инфразвуковой волны в волноводе «земля – стратосфера» (а также отчасти в волноводе «земля – термосфера») с затуханием. Получена оценка коэффициента затухания ( $0.054 \text{ Мм}^{-1}$ ). При этом глубина затухания составляла около 18.4 Мм.

3. Наиболее предпочтительными являются зависимости (6), (7), которые описывают ослабление волны при волноводном распространении с «высвечиванием» части ее энергии.

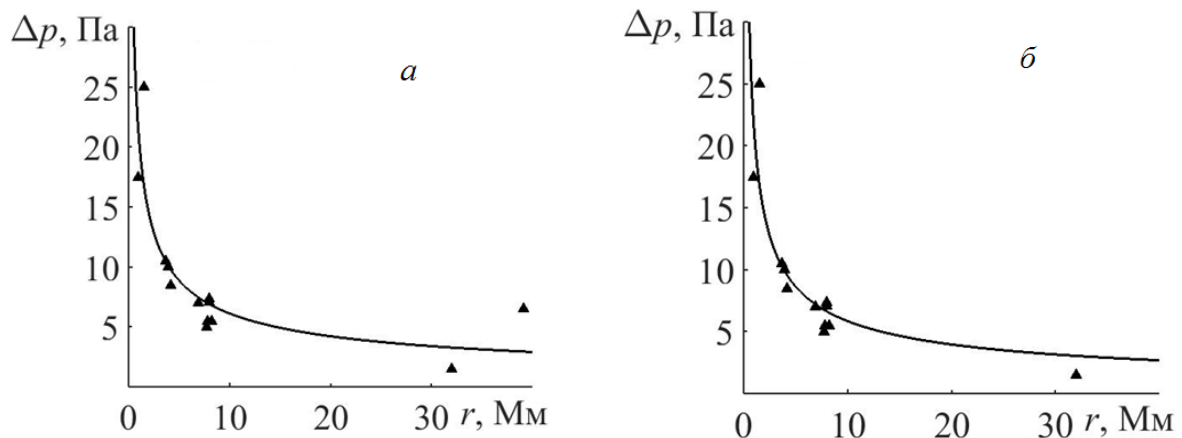


Рис. 4. Зависимость амплитуды волны давления, сгенерированной извержением вулкана St. Helens, от расстояния между эпицентром и микробарографом. Аппроксимация степенным законом: *а* – по 13 трассам, опущены данные станций DeBilt, Netherlands (7.982, 20) и Akita, Japan (7.453, 1.5),  $\Delta p = 21.05r^{-0.536}$ ,  $R \approx 0.86$ ,  $\sigma \approx 3.21$ ; *б* – по 12 трассам, опущены данные станций Berkeley, CA (39.11, 6.5), DeBilt, Netherlands (7.982, 20) и Akita, Japan (7.453, 1.5),  $\Delta p = 21.33r^{-0.562}$ ,  $R \approx 0.88$ ,  $\sigma \approx 3.17$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne eds., “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies,” / A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne eds. // Springer, New York, 2010. – 734 p.
2. Ponomarev E. A. Infrasonic waves in the Earth’s atmosphere (review) / E. A. Ponomarev, A. I. Erushchenkov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1977. – V. 20, №.12. – P. 1218 – 1229.
3. Cook R. K. Strange Sounds in the Atmosphere. Part II / R. K. Cook, J. M. Young // Sound: Its Uses and Control. – 1962. – V. 1, №. 3. – P. 25 – 33.
4. ReVelle D. O. On meteor-generated infrasound / D. O. ReVelle // Journal of Geophysical Research. – 1976. – V. 81, №. 7. – P. 1217–1230.
5. Balachandran N. K. Infrasonic signals from thunder. / N. K. Balachandran // J. Geophys. Res. – 1979. – V. 84, № C4. – P. 1735 – 1745.
6. Donn W. L. Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Air waves and explosive yield / W. L. Donn, N. K. Balachandran // Science. – 1981. – V. 213, №. 4507. – P. 539–541.
7. Reed, J. W. (1987), Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions / J. W. Reed // Journal Geophysical Research. – 1987. – V.92, № D10. – P. 11979–11992. doi:10.1029/JD092iD10p11979.
8. ElGabry M. N. Infrasound detection of meteors / M. N. ElGabry, I. M. Korrat, H. M. Hussein, I. H. Hamama // NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. – 2017. – V. 6, №. 1. – P. 68–80.
9. On the complementarity of infrasound and seismic sensors for monitoring snow avalanches / A. Kogelnig, E. Suriñach, I. Vilajosana [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2011. – V. 11, №. 8. – P. 2355 – 2370.
10. Donn W. L. Infrasound at long range from Saturn V, 1967 / W. L. Donn, E. Posmentier, U. Fehr, N. K. Balachandran // Science. – 1968. – V. 162, №. 3858. – P. 1116–1120.
11. Balachandran N. K. Characteristics of Infrasonic Signals from Rockets / N. K. Balachandran, W. L. Donn // Geophysical Journal International. – 1971. – V. 26, Is. 1–4. – P. 135–148.
12. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. Concorde sonic booms as an atmospheric probe / N. K. Balachandran, W. L. Donn, D. H. Rind // Science. – 1977. – V. 197, №. 4298. – P. 47–49.
13. Donn W. L. Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde / W. L. Donn // American Scientist. – 1978. – V. 66, №. 6. – P. 724–733.
14. Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde / A. Pichon, M. Garcés, E. Blanc, [et al.] // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2002. – V. 111, №. 1. – P. 629–641.
15. Landès, M., Ceranna L., A. Le Pichon, Matoza R. S. Localization of microbarom sources using the IMS infrasound network / M. Landès, L. Ceranna, A. Le Pichon, R. S. Matoza // Journal Geophysical Research – 2012. – V. 117. – P. D06102, doi:10.1029/2011JD016684.
16. Olson J. Infrasound rocket signatures / J. Olson // Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. – 2012. – V. 1. – P. 82.
17. Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea / I. Y. Che, J. Park, I. Kim [et al.] // Geophysical Journal International. – 2014. – V. 198, №. 1. – P. 495–503.