

УДК 550.385.37: 550.388

СИСТЕМНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА, СГЕНЕРИРОВАННОГО ЧЕЛЯБИНСКИМ МЕТЕОРОИДОМ

О. В. ЛАЗОРЕНКО, Л. Ф. ЧЕРНОГОР

*Харьковский национальный университет,
Украина, Харьков, 61077, пл. Свободы, 4*

Аннотация. Приведены результаты системного спектрального анализа, использующего ряд линейных и нелинейных интегральных преобразований, временных регистраций акустического сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом и зарегистрированного инфразвуковой станцией в Антарктиде. Проанализирована тонкая время-частотная структура сигнала.

Ключевые слова: спектральный анализ; линейное интегральное преобразование; нелинейное интегральное преобразование; показатель широкополосности; структура сигнала; параметры источника; канал распространения; задача обнаружения и идентификации

1. ВВЕДЕНИЕ

Инфразвуковые волны, возникшие после пролета и взрыва Челябинского тела, зарегистрированы инфразвуковыми станциями международной системы мониторинга ядерных испытаний с энерговыделением не менее 1 кт, а также станциями, расположенными в ряде геофизических обсерваторий. Ближайшая от места взрыва метеороида станция расположена в г. Актюбинск, Республика Казахстан (расстояние от источника инфразвука $R \approx 540$ км), наиболее удаленная станция — в Антарктиде, для которой R составляет 15500 км (прямой сигнал) и 25000 км (обратный сигнал).

Порожденные Челябинским метеороидом инфразвуковые волны, испытав многократные отражения, преломление и рассеяние в атмосфере и преодолев расстояние в тысячи километров зарегистрированы чувствительными микробарографами. Амплитуда и спектр инфразвука несут в себе информацию об источнике волн и параметрах атмосферы [1–9].

Результаты наблюдений инфразвукового эффекта Челябинского метеороида представлены в [10–13], а результаты теоретических оценок — в [14–17].

Для повышения точности определения параметров (энергия, мощность, время и характер воздействия, время-частотное распределение энергии, распределение энергии по вызываемым физическим процессам, и т.п.) источников инфразвука, таких как землетрясения, взрывы вулканов, падения крупных космических тел естественного и техногенного происхождения, стартов и полетов ракет и самолетов, мощных взрывов, а также их селекции требуется знание тонкой время-частотной структуры инфразвуковых сигналов. Поскольку подобные сигналы, будучи реакцией открытой нелинейной динамической системы Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ) на действие мощного нестационарного источника энерговыделения являются, как правило, кратковременными, сверхширокополосными

DOI: [10.20535/S0021347017080015](https://doi.org/10.20535/S0021347017080015)

© О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор, 2017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reed, J. W. Airblast overpressure decay at long ranges. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, P. 1623–1629, 1972. DOI: <http://doi.org/10.1029/JC077i009p01623>.
2. ReVelle, D. O. On meteor-generated infrasound. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, P. 1217–1230, 1976. DOI: [10.1029/JA081i007p01217](https://doi.org/10.1029/JA081i007p01217).
3. Edwards, W. N.; Brown, P. G.; ReVelle, D. O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol. 68, No. 10, P. 1136–1160, 2006. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.02.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.010).
4. Stevens, J. L.; Adams, D. A.; Baker, G. E.; Murphy, J. R. Infrasound scaling and attenuation relations from Soviet explosion data and instrument design criteria from experiments and simulations. *Proc. of 21th Annual Seismic Research Symposium on Monitoring a CTBT*, 1999, pp. 185–194.
5. Silber, E. A.; ReVelle, D. O.; Brown, P. G.; Edwards, W. N. An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, P. 1–8, 2009. DOI: [10.1029/2009JE003334](https://doi.org/10.1029/2009JE003334).
6. Edwards, W. N. *Meteor-generated Infrasound: Theory and Observation*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010, pp. 361–414.
7. Silber, E. A.; Le Pichon, A.; Brown, P. G. Infrasound detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, No. 12, 2011. DOI: [10.1029/2011GL047633](https://doi.org/10.1029/2011GL047633).
8. Ens, T. A.; Brown, P. G.; Edwards, W. N.; Silber, E. A. Infrasound production by bolides: A global statistical study. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol. 80, P. 208–229, 2012. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.01.018).
9. Емельяненко, В. В.; Попова, О. П.; Чугай, Н. Н.; Шеляков, М. А.; Пахомов, Ю. В.; Шустов, Б. М.; Шува-лов, В. В.; Бирюков, Е. Е.; Рыбнов, Ю. С.; Мааров, М. Я.; Рыхлова, Л. В.; Нароенков, С. А.; Карташова, А. П.; Харламов, В. А.; Трубецкая, И. А. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. *Астрономический вестник*, Т. 47, № 4, С. 262–277, 2013. DOI: [10.7868/S0320930X13040130](https://doi.org/10.7868/S0320930X13040130).
10. Рыбнов, Ю. С.; Попова, О. П.; Харламов, В. А.; и др. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям. *Динамические процессы в геосферах*. Сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: Геос, 2013. Вып. 4, С. 21–31.
11. Алпатов, В. В.; Буров, В. А.; Вагин, Ю. П.; и др. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* М.: ФГБУ ИПГ, 2013. 37 с.
12. Сорокин, А. Г. Об инфразвуковом излучении Челябинского метеороида. *Труды XXIV Всероссийской научной конференции. Распространение радиоволн. РРВ-24*, Иркутск, 29 июня — 5 июля 2014. 2014, Т. III, С. 242–245.
13. Le Pichon, A.; Ceranna, L.; Pilger, C.; Mialle, Pierrick; Brown, David; Herry, Pascal; Brachet, Nicolas. The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 40, No. 14, P. 3732–3737, 2013. DOI: [10.1002/grl.50619](https://doi.org/10.1002/grl.50619).
14. Черногор, Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*, № 8, С. 23–40, 2013. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21790207>.
15. Черногор, Л. Ф.; Розуменко, В. Т. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *ВАНТ*, Т. 86, № 4, С. 136–139, 2013.
16. Черногор, Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Материалы Всероссийской научной конференции «Метеорит Челябинск — год на Земле»*. Челябинск, 2014, С. 229–264.
17. Черногор, Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді НАН України*, № 10, С. 97–104, 2013. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/86192>.
18. Лазоренко, О. В.; Черногор, Л. Ф. *Сверхширокополосные сигналы и процессы*. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. 576 с.
19. Лазоренко, О. В.; Черногор, Л. Ф. Системный спектральный анализ сигналов: теоретические основы и практические применения. *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 12, № 2, С. 162–182, 2007. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/600>.
20. Deutsche IMS-Stationen, http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Seismologie/Kernwaffenteststopp_en/%C3%9Cberwachungsnetz_en/Deutsche-IMS-Stationen/deutsche-ims-stationen_inhalt.html.

21. Cansi, Y. An automated seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 22, No. 9, P. 1021–1024, 1995. DOI: [10.1029/95GL00468](https://doi.org/10.1029/95GL00468).

22. Лазоренко, О.В. Использование атомарных функций в Чои-Вильямс-анализе сверхширокополосных сигналов. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 52, № 8, С. 3–12, 2009. URL: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347009080019>.

23. Пасечник, И.П. Наука доказала: ядерные взрывы можно обнаружить, где бы они ни производились. *Природа*, № 7, С. 3–12, 1962.

24. Голицын, Г.С.; Докучаев, В.П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоро-

ров в атмосфере. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, Т. 13, № 9, С. 926–936, 1977.

25. Госсард, Э.; Хук, У. *Волны в атмосфере*. Пер. с англ. И.М.Шейнис под ред. Г.С.Голицын. М.: Мир, 1978. 532 с.

26. Черногор, Л.Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. *Геомагнетизм и аэрономия*, Т. 51, № 1, С. 119–132, 2011.

27. Черногор, Л.Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ им. В.Н.Каразина, 2012. 556 с.

Поступила в редакцию 23.03.2016

После переработки 09.01.2017
