

Выводы

В целом по приведенным результатам заключаем, что амплитудный модулятор целесообразно использовать при формировании пучка с заданным

распределением интенсивности, в то же время его применение не обеспечивает эффективной передачи энергии лазерного излучения в турбулентной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вохник О.М., Снажакин В.А., Терентьева И.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик твердотельного лазера с ВРМБ-зеркалом // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 3. – С. 393–396.
2. Love G.D., Fender J.S., Restaino. Adaptive wave front shaping with liquid crystals // Opt. Photon. News. – 1995. – V. 6. – P. 16–21.
3. Roggemann M.C., Lee D.J. A two deformable mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection through the turbulent atmosphere // Applied Optics. – 1998. – V. 37. – № 21. – P. 4577–4585.
4. Barchers J.D. Evaluation of the impact of finite-resolution effects on scintillation compensation using two deformable mirrors // J. Opt. Soc. Am. A. – 2001. – V. 18. – № 12. – P. 3098–3109.
5. Barchers J.D. Application of the parallel generalized projection algorithm to the control of two finite-resolution deformable mirrors for scintillation compensation // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – V. 19. – № 1. – P. 54–63.
6. Barchers J.D. Closed-loop stable control of two deformable mirrors for compensation of amplitude and phase fluctuations // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – V. 19. – № 5. – P. 926–945.
7. Barchers J.D., Ellerbroek B.L. Improved compensation of turbulence-induced amplitude and phase distortions by means of multiple near-field phase adjustments // J. Opt. Soc. Am. A. – 2001. – V. 18. – № 2. – P. 399–411.
8. Лукин В.П. Сравнительные характеристики некоторых алгоритмов коррекции // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8. – № 10. – С. 2145–2153.

Поступила 05.07.2012 г.

УДК 534.2

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ОТ НАЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ

Д.С. Провоторов, А.В. Соловьев, Ю.А. Виноградов

Томский государственный университет
E-mail: provotorov@sibmail.com

Определены амплитудно-частотные характеристики инфразвуковых сигналов, генерируемых наземными взрывами. С помощью метода триангуляции определены направления прихода акустических сигналов, которые указывают на источник, где проводились взрывные работы. Использование вейвлет-преобразования с базовой функцией Морле позволило однозначно идентифицировать низкочастотные акустические сигналы от наземных взрывов.

Ключевые слова:

Инфразвук, источники инфразвуковых сигналов, наземные взрывы.

Key words:

Infrasound, sources of infrasonic signals, land explosions.

В настоящее время исследованию низкочастотных акустических сигналов уделяется большее внимание. Их изучение актуально в связи с необходимостью обоснования надежных сигнальных признаков техногенных воздействий (запуски ракет, несанкционированные взрывы и ядерные испытания). Кроме того, результаты этих работ могут быть использованы для идентификации отливов от цунами и предвестников землетрясений.

На сегодняшний день Организация по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний ведет мониторинг сейсмических и инфразвуковых сигналов от ядерных взрывов, но наряду с этим во многих районах земного шара выполняется большой объем горных, дорожных работ, сопровождающихся подземными и наземными

взрывами, а также взрывы от деятельности военных, которые не отслеживаются всемирной сетью. Очень важно иметь представление об инфразвуковых сигналах, порождающихся наземными взрывами, с целью обнаружения источников этих сигналов.

Целью данной работы является исследование сигналов от наземных взрывов для выявления сигнальных признаков низкочастотных акустических сигналов, разработка методики выделения и определения пеленга на источник.

Исследованию инфразвуковых сигналов от наземных взрывов посвящено большое количество работ. В работе [1] представлены результаты анализа исследования распространения инфразвуковых волн от взрывов. В работе [2] на примере повто-

ряющихся взрывов, происходивших на полигоне в северной Финляндии, проведен анализ вариаций оценок азимутов и кажущихся скоростей приходов звуковых волн на датчики сейсмоакустического комплекса «Апатиты». Получены оценки точности локации этих взрывов. Показано, что связь между погодными условиями и фактом наличия или отсутствия первого прихода инфразвуковой волны действительно существует. В работе [3] исследованы вариации амплитуды импульсов давления от маломощных наземных взрывов при различных параметрах окружающей среды.

С марта 2010 г. в Новосибирской и Кемеровской областях проходит программа уничтожения боеприпасов. В Томском государственном университете в режиме непрерывного мониторинга ведется регистрация низкочастотных акустических сигналов инфразвукометрическим комплексом. Комплекс включает три пространственно разнесенных микробарометра марки ISGM03, позволяющие регистрировать акустические сигналы в частотном диапазоне от 0,02 до 4,00 Гц, максимальное отклонение чувствительности от среднего значения в рабочем диапазоне частот – 2,5 %. Размещение измерительных пунктов представляет собой форму треугольника. Расстояние между первым и вторым пунктами регистрации 98 м, расстояние между вторым и третьим – 276 м (рис. 1).

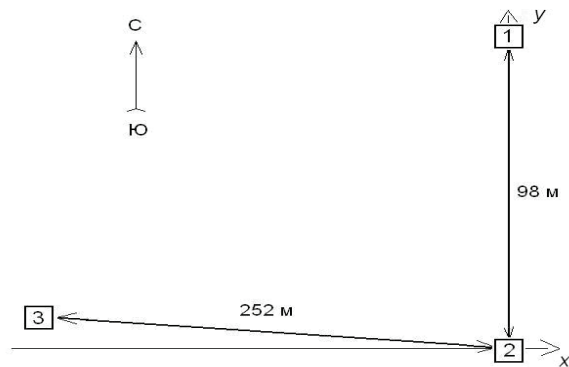
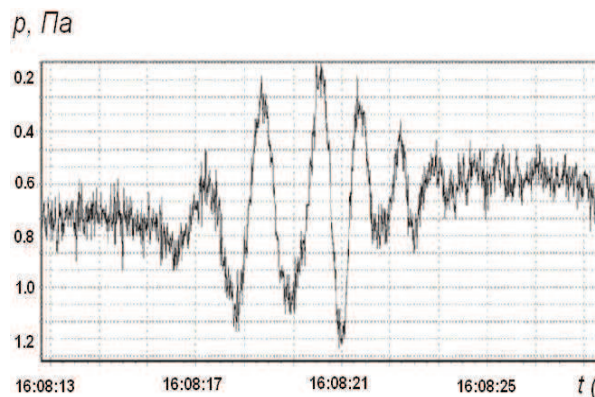


Рис. 1. Схема расположения измерительных пунктов (цифрами обозначены измерительные пункты)



а

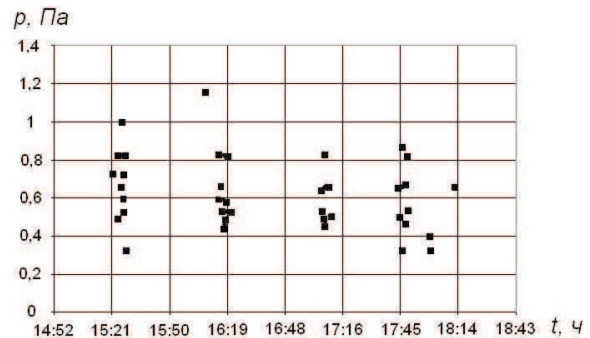
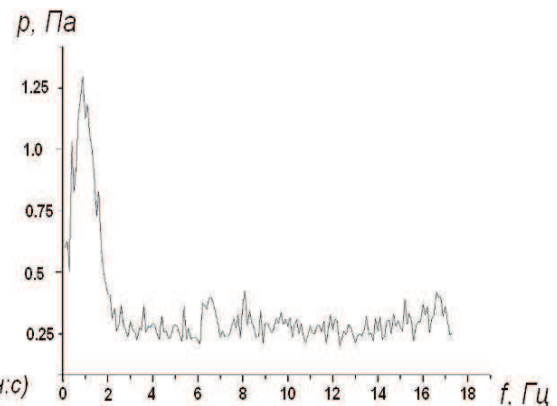


Рис. 2. Время появления инфразвуковых сигналов 25 января 2011 г.

Временная форма для всех регистрируемых сигналов имеет схожий вид. Сигнал представляет собой форму цуга, состоящего из нескольких периодов с постепенно нарастающей и потом убывающей амплитудой и с монотонно уменьшающимся периодом (рис. 3, а). Спектральный анализ показал, что усредненный спектр данных сигналов имеет максимум на частоте 1 Гц (рис. 3, б).

Для выделения регистрируемых сигналов от взрывов из шумов, а также для анализа внутренней частотной структуры было использовано вейвлет-преобразование. В качестве базовой функции вейвлет-преобразования использовалась функция Морле [4], вид которой наиболее приближен к форме исследуемых сигналов (рис. 4, а).



б

Рис. 3. Временная форма инфразвукового сигнала от наземного взрыва, зарегистрированного микробарометром № 2 (а); усредненный спектр инфразвуковых сигналов (б)

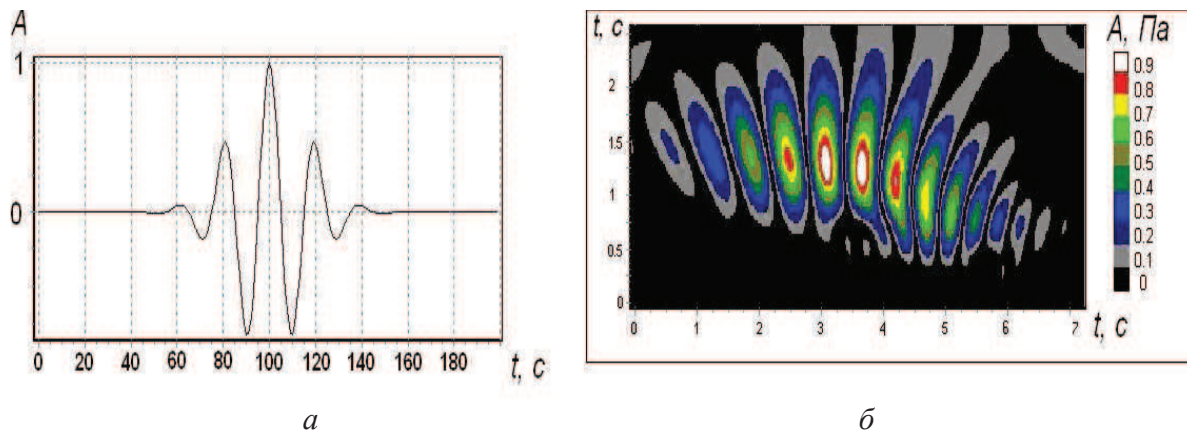


Рис. 4. Временное представление базовой вейвлет-функции (Морлет) (а) и результат вейвлет-преобразования сигнала (б)

Использование вейвлет-преобразования с данной базовой функцией позволило однозначно идентифицировать низкочастотные акустические сигналы от наземных взрывов. Типичный вид вейвлет-преобразования импульсных сигналов от взрывов представлен на рис. 4, б. Цветом представлено изменение амплитуды сигналов. Характерной особенностью сигналов от наземных взрывов является монотонное изменение периодов от 1,50 до 0,75 с. Вместе с тем в момент максимальной амплитуды акустических сигналов от наземных взрывов проявляются высокочастотные составляющие порядка 0,5 с (рис. 4, б).

Анализ амплитуд сигналов от пика до пика показал, что наибольшее количество сигналов наблюдалось с амплитудой от 0,5 до 0,7 Па с разбросом максимальной амплитуды от пика до пика в пределах от 0,4 до 1,2 Па. Длительность сигналов составляла от 2 до 8 с, средняя длительность сигнала 5 с (рис. 5).

Для определения направления прихода инфразвуковых волн от взрывов использовался известный метод триангуляции [5], основанный на измерении задержек прихода инфразвукового сигнала на пространственно разнесенные измерительные пункты.

Расчет азимутального прихода акустических сигналов проводился по формуле [6]:

$$\theta = \arctg \frac{\tau_{21}(x_1 - x_2) - \tau_{21}(x_1 - x_3)}{\tau_{23}(y_1 - y_2) - \tau_{23}(y_1 - y_3)},$$

где τ_{21} и τ_{23} – временные задержки прихода инфразвукового сигнала на 1-й и 3-й измерительные пункты относительно 2-го соответственно (рис. 1); (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) – координаты измерительных пунктов декартовой системе координат с центром во 2-м измерительном пункте. Координатные оси абсцисс и ординат совпадают с географическими направлениями восток–запад и север–юг соответственно (рис. 1).

За весь период наблюдений инфразвуковые сигналы поступали с двух угловых секторов (рис. 6). Наибольшее количество сигналов приходило с углового сектора, совпадающим с направлением на полигон с. Шилово Новосибирской области (обозначенный на рисунке светло-серым цветом). Второй угловой сектор (обозначенный темно-серым цветом) совпадает с направлением на полигон вблизи г. Юрга Кемеровской области. Следует отметить, что угловой разброс направления прихода инфразвуковых сигналов связан с влиянием метео-

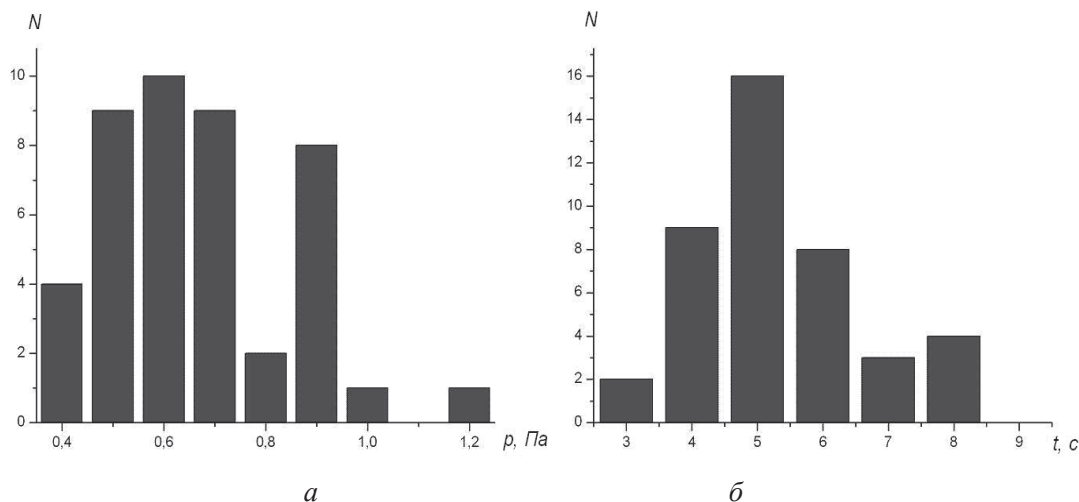


Рис. 5. Распределения амплитуд (а) инфразвуковых сигналов от пика до пика и длительности сигналов (б)

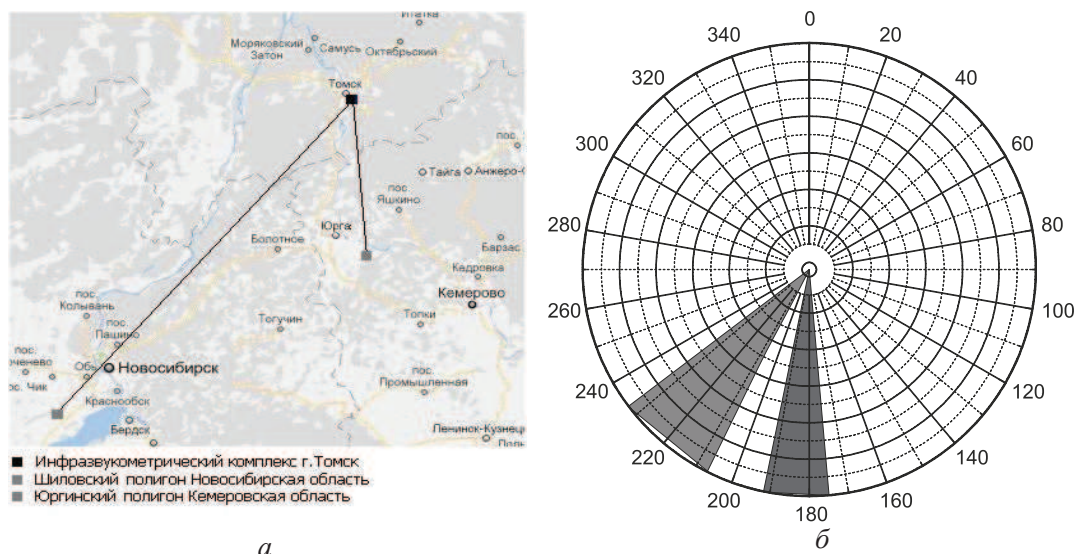


Рис. 6. Направление полигонов, от которых были зарегистрированы инфразвуковые сигналы (а) и угловые сектора прихода сигналов (б): светло-серый цвет – сектор угла от 207 до 231°, темно-серый цвет – сектор угла от 175 до 190° относительно меридиана Земли

рологических условий на распространение акустической волны [2, 7, 8]. Расстояние от Шиловского полигона до места расположения инфразвукометрического комплекса в г. Томске составляет 254 км, от Юргинского – 96 км. Направления на военные полигоны попадают именно в те угловые секторы, откуда по нашему анализу приходили инфразвуковые сигналы. На карте угол между направлением полигона с. Шилово и меридианом Земли относительно точки расположения инфразвукометрического комплекса г. Томска равен 220°, угол между направлением полигона г. Юрги и меридианом – 176° (рис. 6, а).

Выводы

Использование вейвлет-преобразования с базовой функцией Морле позволило однозначно идентифицировать низкочастотные акустические сигналы от наземных взрывов. Характерной особенностью сигналов от наземных взрывов является монотонное изменение периодов от 1,50 до 0,75 с. Типичный вид инфразвуковых сигналов от назем-

ных взрывов представляет собой форму цуга, состоящего из 5–10 периодов с постепенно нарастающей и потом убывающей амплитудой и монотонно уменьшающимся периодом. Среднее значение частотной составляющей имеет максимум на частоте 1 Гц. С помощью метода триангуляции определены направления прихода акустических сигналов, которые указывают на источник, где проводились взрывные работы. Идентификация низкочастотных акустических сигналов от наземных взрывов может быть использована для разработки методов локации и обнаружения наземных взрывов, а также для построения модели распространения акустических сигналов в реальной атмосфере.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (Соглашение № 14.В37.21.1893), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.», гранта РФФИ № 12-05-90804-мол_рф_нр. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ ГК № 16.518.11.7048.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Куличков С.Н. Дальнее распространение звука в атмосфере (обзор) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 28. – № 4. – С. 339–360.
- Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12. – № 2. – С. 300–307.
- Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Евменов В.Ф. Экспериментальные исследования влияния приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности на амплитуду слабых воздушных ударных волн от наземных химических взрывов // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 98–100.
- Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 123.
- Waldemark K. High Resolution for Infrasound Recording at the Swedish Institute of Space Physics // Swedish Institute of Space Physics, IRF Scientific Report 242. – 1997. – P. 124–126.
- Donn W.L. Atmospheric infrasound radiated by bridges // J. Acoust. Soc. Amer. – 1974. – V. 56. – № 5. – P. 1367–1370.
- Провоторов Д.С., Соловьев А.В., Сорокин А.Г. Связь сезонноточных вариаций спектральной плотности инфразвукового фона с метеорологическими величинами // Известия вузов. Сер. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/3. – С. 227–228.
- Бочаров А.А., Колесник А.Г., Соловьев А.В. Акустические шумы урбанизированных территорий на примере г. Томска // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 191–196.

Поступила 05.04.2012 г.