

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.04.280>УДК 551.558, 551.596,
534.221

Л. Ф. ЧЕРНОГОР, А. И. ЛЯЩУК, Н. Б. ШЕВЕЛЕВ

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

PACS numbers: 93; 96.30.Ys

пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

ПАРАМЕТРЫ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ, СГЕНЕРИРОВАННЫХ МАССОВЫМИ ВЗРЫВАМИ НА АРСЕНАЛЕ БОЕПРИПАСОВ

Предмет и цель работы: Предмет исследования – зависимость волновых форм и спектрального состава инфразвукового сигнала, сгенерированного массовыми взрывами на арсенале боеприпасов, от энерговыделения и расстояния. Целью является изучение особенностей волновых форм инфразвуковых сигналов, их амплитуд и спектрального состава при дальнем (~ 150 ÷ 180 км) распространении волн, сгенерированных в течение техногенной катастрофы на арсенале боеприпасов вблизи г. Винница 26–27 сентября 2017 г.

Методы и методология: С использованием украинской сети инфразвуковых станций изучены основные параметры (спектральный состав, амплитуды, периоды преобладающих колебаний, длительность цугов колебаний, скорость прихода) инфразвуковых волн при их дальнем (~ 150 ÷ 180 км) распространении. Методика обработки в настоящих исследованиях сводилась к следующему. Сначала результаты измерений временных зависимостей колебаний атмосферного давления переводились из относительных единиц в абсолютные. Далее они подвергались фильтрации в диапазоне периодов 0.2 ÷ 10 с. Затем осуществлялся системный спектральный анализ отфильтрованных зависимостей при помощи оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. При использовании вейвлет-преобразования в качестве базисной функции привлекался вейвлет Морле.

Результаты: Показано, что при увеличении энерговыделения от 3 до 53 т ТНТ наблюдалась тенденция к увеличению амплитуды и периода преобладающего колебания. Длительность цугов колебания при этом увеличивалась от ≈ 1.5 до 2 мин. Установлено, что при небольшом изменении расстояния (на 15 ÷ 18 %) между эпицентром взрывов и месторасположением инфразвуковой станции параметры инфразвукового сигнала изменялись незначительно. Различия в волновых формах связаны с ориентацией трассы. Выявлено, что при энерговыделении, равном 53 т ТНТ, в спектре колебаний преобладали гармоники с периодом от 3 до 5 ÷ 6 с. Длительность цугов колебаний с такими периодами составляла 40 с. Рассчитано, что средняя скорость прихода для различных трасс при стратосферном отражении волн изменялась в пределах 300 ÷ 309 м/с, что свидетельствует о влиянии ветра в верхней атмосфере на распространение инфразвука. При термосферном отражении волн амплитуда сигнала была в несколько раз меньше, а скорость прихода составляла 245 ÷ 250 м/с.

Заключение: Изучены основные параметры инфразвуковых сигналов, сгенерированных в течение повторяющихся взрывов на военных складах вблизи г. Винница и распространявшихся в атмосфере.

Ключевые слова: инфразвуковые сигналы, массовые взрывы, энерговыделение, волновые формы, параметры сигнала, спектральный состав, скорости прихода

1. Введение

Источником инфразвуковых волн является ряд физических процессов природного и техногенного происхождения [1, 2]. К первым относятся резкие изменения космической погоды [3], падения крупных космических тел [4–7], грозы [8], атмосферные фронты [9, 10], извержения вулканов [11–17], землетрясения [18] и др. Ко вторым – мощные взрывы [19–22], полеты самолетов [23–26] и ракет [27–29], мегаполисы [30, 31] и др.

Одним из источников инфразвуковых волн являются массовые химические взрывы. Они могут применяться при карьерных разработках по-

лезных ископаемых [32], при проведении военных действий [33–35], а также наблюдаться при катастрофах на военных складах и арсеналах боеприпасов [36–40]. Подобные катастрофы, к большому сожалению, неоднократно случались в Украине: в 2003 г. возле г. Артемовск (теперь г. Бахмут), в 2004 г. возле г. Мелитополь, в 2008 г. возле г. Лозовая, в 2015 г. возле г. Сватово [35, 40]. Только в 2017 г. имели место две крупнейшие катастрофы на военных складах возле г. Балаклея и г. Винница [41].

С точки зрения геофизики и физики геокосмоса массовые взрывы представляют собой разновидность активных экспериментов. Активные эксперименты проводятся для изучения прямых и обратных, положительных и отрицательных свя-

зей в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера и для изучения взаимодействия подсистем в этой системе.

Взрывы как источник возмущений, как источник инфразвука давно используются в научных целях [42–44]. Для изучения атмосферы на высотах до 100 км и дальнего распространения инфразвуковых волн применяют химические взрывы с относительно небольшим энерговыделением ($\sim 1 \div 10$ кг ТНТ) [42–44]. Для исследования реакции верхней атмосферы, ионосферы и магнитосферы используют химические взрывы с тротиловым эквивалентом от сотни тонн до единиц килотонн [45–58].

Реакция системы Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера на отдельный взрыв изучена сравнительно хорошо [47–57].

Воздействие массовых относительно маломощных взрывов на указанную систему исследовано значительно хуже. Имеются лишь отдельные работы, посвященные подобным исследованиям [33–39]. В этих работах продемонстрировано, что массовые химические взрывы в той или иной степени могут затрагивать все подсистемы системы Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера.

Сложность исследования особенностей распространения инфразвуковых волн, сгенерированных в течение техногенной катастрофы на арсенале боеприпасов, заключается в следующем. Во-первых, взрывы сопровождаются интенсивными пожарами, которые сами являются источником инфразвука. Во-вторых, возмущения в околоземной среде над местом катастрофы при повторяющихся сериях взрывов постепенно накапливаются, образуется своеобразный купол, параметры которого существенно отличаются от параметров невозмущенной атмосферы. В-третьих, этот купол существенно влияет на условия захвата инфразвуковых волн в волноводах Земля–стратосфера, Земля–мезосфера и Земля–термосфера. В-четвертых, интенсивность взрывов в различных сериях разная, что предопределяет интенсивность и спектральный состав инфразвуковых волн, сгенерированных в течение массовых химических взрывов.

Таким образом, исследование параметров инфразвуковых волн, образовавшихся в процессе техногенных катастроф на военных складах, и

особенностей их распространения является актуальной радиофизической задачей.

Целью настоящей работы является изучение особенностей волновых форм инфразвуковых сигналов, их амплитуд и спектрального состава при дальнем ($\sim 150 \div 180$ км) распространении волн, сгенерированных в течение техногенной катастрофы на арсенале боеприпасов вблизи г. Винница 26–27 сентября 2017 г.

2. Общие сведения о катастрофе

На военных складах (арсенал № 48 Минобороны Украины, в/ч А-1119), дислоцированных вблизи поселка городского типа Калиновка, Винницкая обл., Украина, находилось около 188 тыс. т боеприпасов (10 тыс. условных вагонов). Площадь арсенала – 60 га. Его географические координаты: $49^{\circ}25'$ с. ш., $28^{\circ}30'$ в. д. На складах хранились артиллерийские снаряды различных калибров, а также ракеты залпового огня “Смерч”, “Ураган” и “Град”. Радиус разлета последних мог достигать десятков километров, а радиус разлета осколков рвущихся снарядов – $3 \div 5$ км. По этой причине было закрыто воздушное пространство в радиусе 50 км от эпицентра катастрофы.

Первая серия массовых взрывов прогремела 26 сентября 2017 г. в 19:59 UT (здесь и далее всемирное время). Массовые взрывы прекратились лишь 27 сентября в 08:03. Всего отмечено 26 серий массовых взрывов. Их энерговыделение изменялось от 0.3 до 53 т ТНТ.

Суммарное энергосодержание на арсенале составляло около 0.1 Мт ТНТ. К счастью, прореагировала лишь часть всех боеприпасов. Взрывы сопровождались масштабными пожарами (рис. 1). Высота пламени достигала $100 \div 150$ м, а высота подъема нагретых продуктов – нескольких километров.

3. Средства и методы

Техногенная катастрофа произошла в центре Украины. Вокруг эпицентра размещены измерительные средства Главного центра специального контроля НЦУИКС (Национальный центр управления и испытаний космических средств) Государственного космического агентства Украины. К ним, в частности, относятся инфразвуковые и сейсмические станции.



Рис. 1. Взрыв и масштабный пожар от детонации боеприпасов на складах неподалеку п. г. т. Калиновка

Для анализа параметров инфразвуковых волн использовались измерения, выполненные на станциях “Каменец-Подольский”, “Малин” и “Балта” (рис. 2). Станции оборудованы микробарографами, функционирующими в диапазонах частот $0.03 \div 10$ Гц (“Каменец-Подольский”), $0.3 \div 10$ Гц (“Малин”) и $0.03 \div 0.3$ Гц (“Балта”). Диапазон измеряемых микробарографами вариаций давле-

ния составлял $0.01 \div 100$ Па. На станции “Каменец-Подольский” (географические координаты 48.56° с. ш., 26.46° в. д.), удаленной от эпицентра взрывов на расстоянии $R = 176$ км, выполнены четырехканальные измерения инфразвукового сигнала. Станция “Малин” (географические координаты 50.70° с. ш., 29.22° в. д.), удаленная от арсенала на 153 км, имеет два канала регистрации инфразвуковых сигналов. Одноканальная станция “Балта” (географические координаты 47.94° с. ш., 29.60° в. д.) удалена от эпицентра катастрофы на 181 км.

При выборе перечисленных инфразвуковых станций было желательно, чтобы станции располагались вокруг эпицентра взрывов и примерно на одинаковом расстоянии от него. Это позволило нам изучить азимутальные особенности распространения волн.

Для определения моментов взрывов и оценки их интенсивности мы использовали данные измерений на 24-элементной сейсмической станции PS45 Международной системы мониторинга



Рис. 2. Расположение станций относительно места катастрофы: 1 – эпицентр катастрофы (в/ч А-1119, Винницкая обл., Украина); 2 – инфразвуковая станция “Каменец-Подольский”; 3 – инфразвуковая станция “Малин”; 4 – инфразвуковая станция “Балта”

Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (МСМ ОДВЗЯИ), дислоцированной возле г. Малин (50.70° с. ш., 29.22° в. д.). Оценка энерговыделения проводилась с использованием магнитуды m_b производимого взрывами землетрясения:

$$\lg E = \frac{m_b - 1.86}{0.72},$$

где m_b – магнитуда землетрясения, полученная для объемных волн; E – энергия, т TNT.

Результаты оценки энергии серий взрывов приведены в табл. 1. Видно, что $E \approx 0.3 \div 53$ т TNT.

Пример регистрации инфразвукового сигнала на индикаторе кругового обзора на станции “Каменец-Подольский” показан на рис. 3. Из рис. 3 видно, что азимут источника инфразвука $A \approx 54.5^\circ \pm 4.63^\circ$.

Таблица 1. Сейсмические данные о сериях взрывов

Дата	Время взрыва (UT)	Магнитуда m_b	Расчетная мощность, т TNT
26 сентября 2017 г.	18:59:59	1.5	0.3
26 сентября 2017 г.	19:01:00	1.9	1.1
26 сентября 2017 г.	19:02:30	2.4	5.6
26 сентября 2017 г.	19:37:18	1.6	0.44
26 сентября 2017 г.	19:38:26	1.7	0.6
26 сентября 2017 г.	19:43:45	2.4	5.6
26 сентября 2017 г.	19:47:42	2.2	3.0
26 сентября 2017 г.	19:53:03	1.8	0.83
26 сентября 2017 г.	19:57:14	2.7	15
26 сентября 2017 г.	19:59:30	3.1	53
26 сентября 2017 г.	20:05:31	1.8	0.83
26 сентября 2017 г.	20:09:19	2.2	3.0
26 сентября 2017 г.	21:39:58	2.4	5.6
26 сентября 2017 г.	22:02:13	2.0	1.6
26 сентября 2017 г.	22:03:56	2.2	3.0
26 сентября 2017 г.	22:14:44	3.1	53
26 сентября 2017 г.	23:17:40	1.6	0.44
26 сентября 2017 г.	23:39:38	1.4	0.23
26 сентября 2017 г.	23:56:42	1.8	0.83
26 сентября 2017 г.	23:58:15	2.0	1.6
27 сентября 2017 г.	01:32:44	1.8	0.83
27 сентября 2017 г.	02:30:25	1.8	0.83
27 сентября 2017 г.	02:31:08	3.0	38
27 сентября 2017 г.	02:40:00	1.7	0.6
27 сентября 2017 г.	05:08:33	2.8	20
27 сентября 2017 г.	08:03:59	1.9	1.1

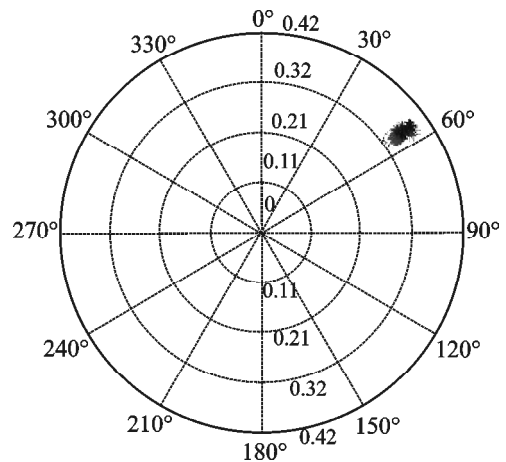


Рис. 3. Панель индикатора кругового обзора для определения азимута источника (станция “Каменец-Подольский”). Вдоль радиуса отложена скорость (в километрах в секунду), угловая координата представляет собой азимут. На индикаторе четко виден след от акустического сигнала, который наблюдался 26 сентября 2017 г. в 20:09:19. Параметры сигнала следующие: азимут – $54.5^\circ \pm 4.6^\circ$, скорость – (0.344 ± 0.0008) км/с. Энерговыделение взрыва составляло 53 т TNT

Результат обработки инфразвукового сигнала, зарегистрированного на станции “Каменец-Подольский” 26 сентября 2017 г., показан на рис. 4. Для повышения достоверности обнаружения инфразвукового сигнала применяется многоканальная корреляционная обработка (верхняя панель), а также оценка азимута и скорости (вторая сверху и третья сверху панели). На четырех нижних панелях приведены волновые формы инфразвукового сигнала, зарегистрированного четырехканальным микробарографом.

Методика обработки данных наблюдений в настоящих исследованиях сводилась к следующему. Сначала результаты измерений временных зависимостей давления $\Delta p(t)$ переводились из относительных единиц в абсолютные. Далее зависимости $\Delta p(t)$ подвергались фильтрации в диапазоне периодов $0.2 \div 10$ с. Затем осуществлялся системный спектральный анализ (ССА) отфильтрованных зависимостей $\Delta p(t)$ при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразования (ВП) [59]. При использовании ВП в качестве базисной функции привлекался вейвлет Морле [59].

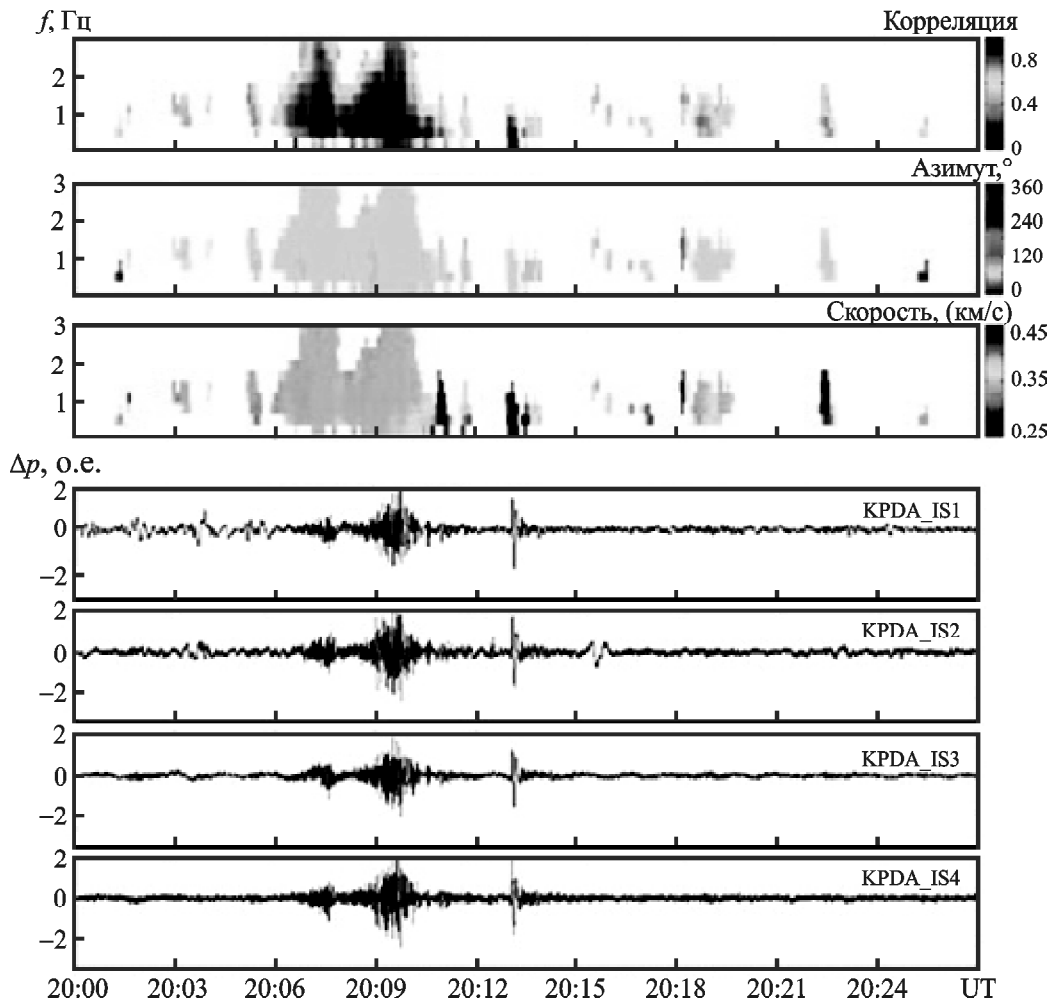


Рис. 4. Результат обработки инфразвукового сигнала, зарегистрированного инфразвуковой станцией “Каменец-Подольский” 26 сентября 2017 г. Панели сверху вниз: коэффициент межканальной корреляции уровня сигнала; азимут источника инфразвука; скорость прихода инфразвука; временные зависимости уровня (в относительных единицах) инфразвука в четырех каналах. Энерговыведение составляло 15 и 53 т ТНТ в периоды времени 20:07:00–20:08:30 и 20:09:00–20:11:00 соответственно

4. Результаты наблюдений и анализа

Зависимость от энерговыведения. Волновые формы отфильтрованных инфразвуковых сигналов, зарегистрированных на станции “Каменец-Подольский” 26–27 сентября 2017 г. при различном энерговыведении, показаны на рис. 5. Со взрывами связаны наиболее интенсивные (с амплитудой $\sim 0.1 \div 0.3$ Па) высокочастотные колебания. На рис. 5, д наблюдаются также колебания с амплитудой около 0.02 Па и периодом $T \approx 6$ с. Такие параметры имеют микробаромы, вызванные океаническим волнением [1, 2]. Проявления микробаром видны также на рис. 5, а, г.

Из рис. 5 видно, что при уменьшении энергии взрывов наблюдается тенденция к уменьшению

амплитуды цуга колебаний и их периода. Длительность цуга колебаний составляла $1.5 \div 2$ мин. Не отмечалась ее четкая зависимость от энергии взрывов. В целом зависимость $\Delta p(t)$ не является монотонной.

Зависимость от расстояния. Волновые формы отфильтрованных инфразвуковых сигналов, зарегистрированных в 20:08–20:12 26 сентября 2017 г. на станциях “Малин”, “Каменец-Подольский” и “Балта”, показаны на рис. 6. Из этого рисунка видно, что при небольшом увеличении расстояния между эпицентром взрывов и станцией амплитуда сигнала изменяется незначительно. Длительность сигнала составляет $1.5 \div 2$ мин. Сигнал состоит из нескольких цугов. Период колебаний от расстояния практически не зависит.

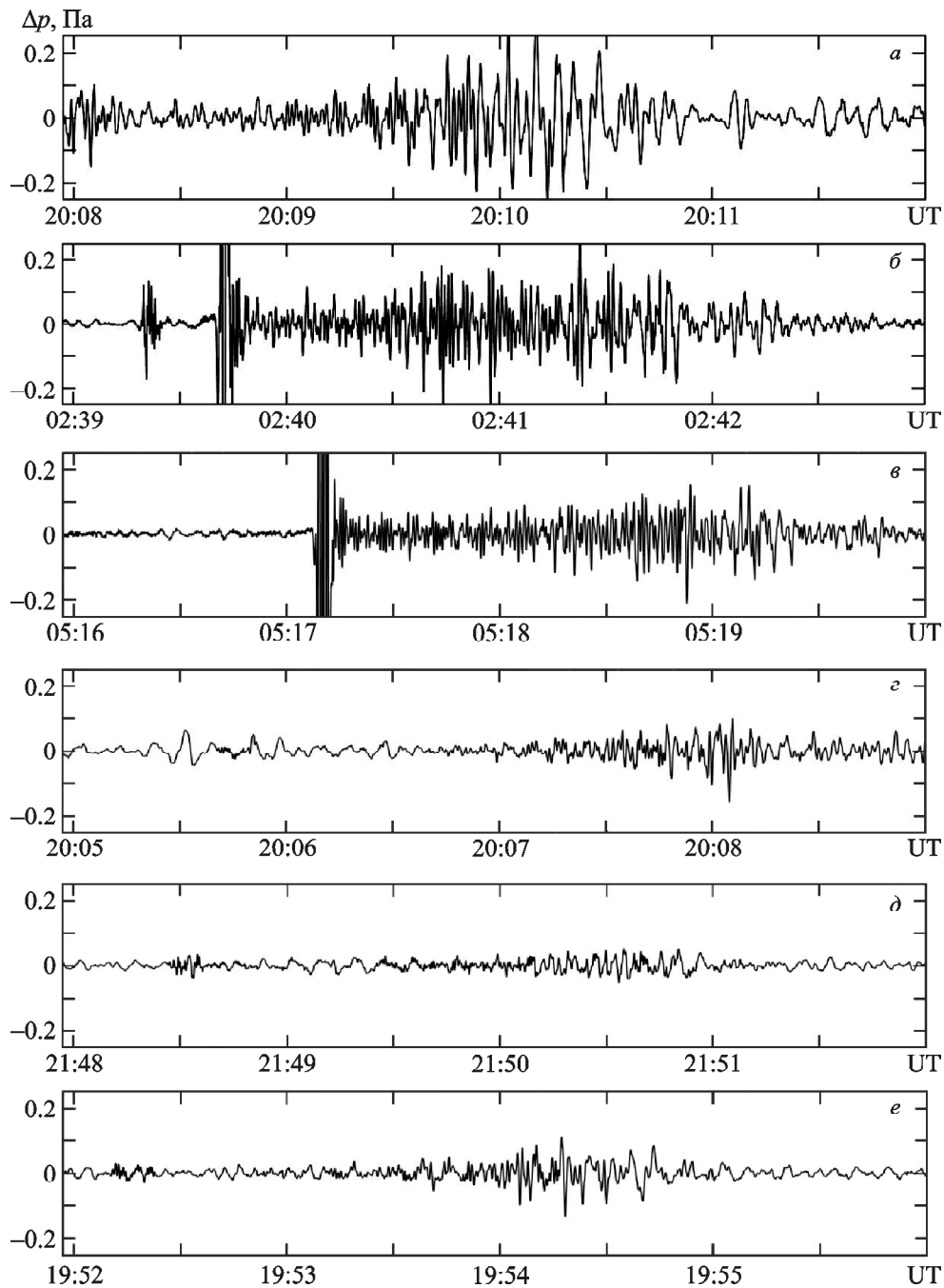


Рис. 5. Волновые формы сгенерированных в результате взрывов инфразвуковых сигналов, зарегистрированных на станции “Каменец-Подольский”: *а* – энерговыведение 53 т ТНТ (26 сентября 2017 г.); *б* – энерговыведение 38 т ТНТ (27 сентября 2017 г.); *в* – энерговыведение 20 т ТНТ (27 сентября 2017 г.); *з* – энерговыведение 15 т ТНТ (26 сентября 2017 г.); *д* – энерговыведение 5.6 т ТНТ (27 сентября 2017 г.); *е* – энерговыведение 3 т ТНТ (26 сентября 2017 г.)

Результаты ССА. Пример результатов ССА зависимости $\Delta p(t)$, зарегистрированной в интервале времени 22:22–22:25 26 сентября 2017 г. на станциях “Малин”, “Каменец-Подольский” и “Балта” для $E \approx 53$ т ТНТ, приведен на рис. 7–9. Из этих рисунков видно, что наблюдались цуги колебаний

с периодами (2.5 ± 0.5) с и (4.5 ± 1) с (станция “Малин”), (3 ± 1) с и (6 ± 1) с (станция “Каменец-Подольский”), а также (4 ± 1) с и (9 ± 2) с (станция “Балта”). Наибольшую амплитуду имело колебание с периодами от 3 до 5–6 с. Его длительность составляла около 40 с. В то же время общая

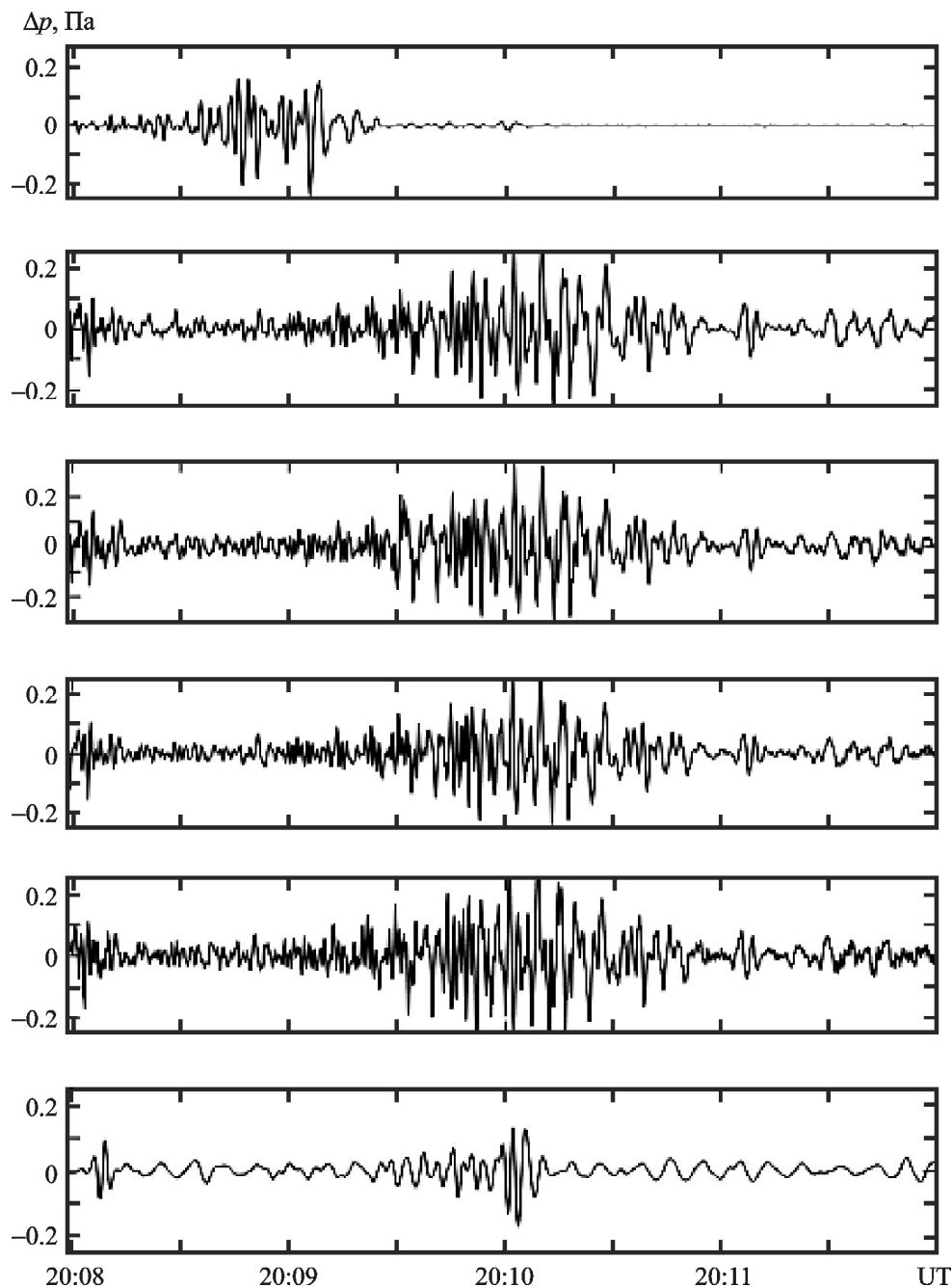


Рис. 6. Волновые формы инфразвуковых сигналов, зарегистрированных 26 сентября 2017 г. (энерговыведение – 53 т ТНТ). Панели сверху вниз: на станции “Малин” ($R \approx 153$ км); на станции “Каменец-Подольский”, каналы 1–4 ($R \approx 176$ км); на станции “Балта” ($R \approx 181$ км)

длительность сигнала изменялась в пределах от 1.5 до 2 мин.

5. Обсуждение

Проблема генерации и распространения инфразвуковых волн в атмосфере в течение техногенных катастроф на арсеналах боеприпасов

в экспериментальном плане до сих пор оставалась неизученной. Теоретические расчеты ожидаемых эффектов выполнены в ряде работ [34–40]. Сложности исследования особенностей генерации и распространения инфразвуковых волн при таких катастрофах перечислены во введении.

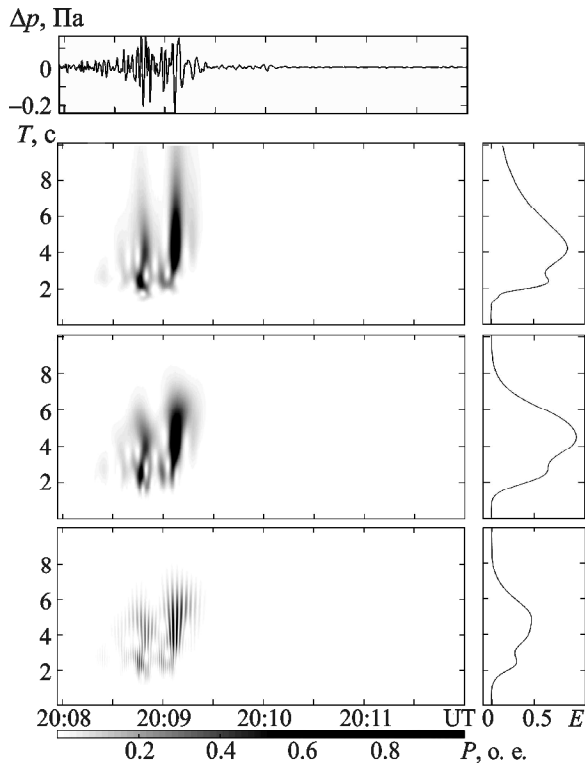


Рис. 7. Результаты полосовой фильтрации и ССА зависимости $\Delta p(t)$, зарегистрированной 26 сентября 2017 г. на станции “Малин”. Панели сверху вниз: волновая форма, результаты ОПФ, АПФ и ВП. Справа показаны энергограммы. Энерговыведение взрыва – 53 т ТНТ. Здесь и далее P – интенсивность сигнала

Для выделения полезного сигнала, связанного со взрывами, в настоящей работе производились измерения азимута источника инфразвука и межканальная корреляционная обработка, а также сопоставление волновых форм сигнала, зарегистрированного на инфразвуковых станциях, удаленных на близкие расстояния ($\sim 150 \div 180$ км). Все это позволило надежно выделить сигналы, связанные с конкретной серией взрывов. Для оценки энергии и момента взрыва привлекались сейсмические данные.

Измерения Δp при энерговыведении от 3 до 53 т ТНТ показали, что амплитуды $(\overline{\Delta p^2})^{1/2}$ увеличивались примерно от 0.04 до 0.16 Па. При этом величина $\overline{\Delta p^2}$ изменялась пропорционально энергии E .

Зависимость Δp от расстояния при его незначительном изменении ($\sim 150 \div 180$ км) выражена слабо (см. рис. 6). Отличия в волновых формах больше связаны с различием полос пропускания

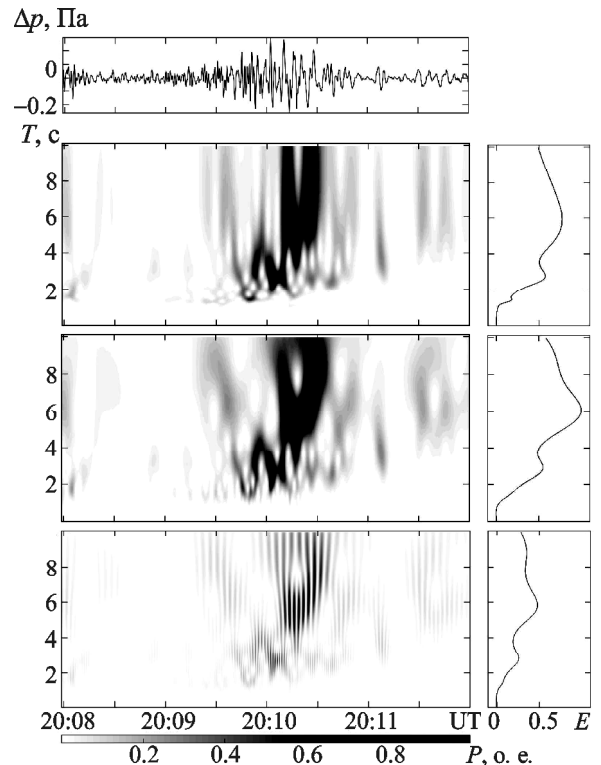


Рис. 8. Результаты полосовой фильтрации и ССА зависимости $\Delta p(t)$, зарегистрированной 26 сентября 2017 г. на станции “Каменец-Подольский”. Панели сверху вниз: волновая форма, результаты ОПФ, АПФ и ВП. Справа показаны энергограммы. Энерговыведение взрыва – 53 т ТНТ

микробарографов на различных станциях, а также с различной ориентацией трасс распространения.

Исходя из рис. 6, можно оценить скорость прихода инфразвуковой волны. На станции “Малин” начало сигнала наблюдалось в 20:08:00, на станции “Каменец-Подольский” – в 20:09:20, а на станции “Балта” – в 20:09:30. Поскольку серия взрывов была зарегистрирована в 19:59:30, времена запаздывания составляют 510, 570 и 600 с. Им соответствуют расстояния 153, 176 и 181 км. Тогда скорости прихода составляют 300, 309 и 301.6 м/с. Такие скорости имеют место при последовательном отражении инфразвуковых волн от стратосферы и поверхности Земли [60]. По полученным скоростям и известным азимутам прихода инфразвукового сигнала можно оценить истинную скорость прихода v_0 и среднюю скорость стратосферного ветра w . Оказалось, что $v_0 \approx (303.5 \pm 0.5)$ м/с, а $w \approx (6.8 \pm 0.7)$ м/с.

Из рис. 6 видно, что примерно через $100 \div 120$ с после прихода основного сигнала наблюдается

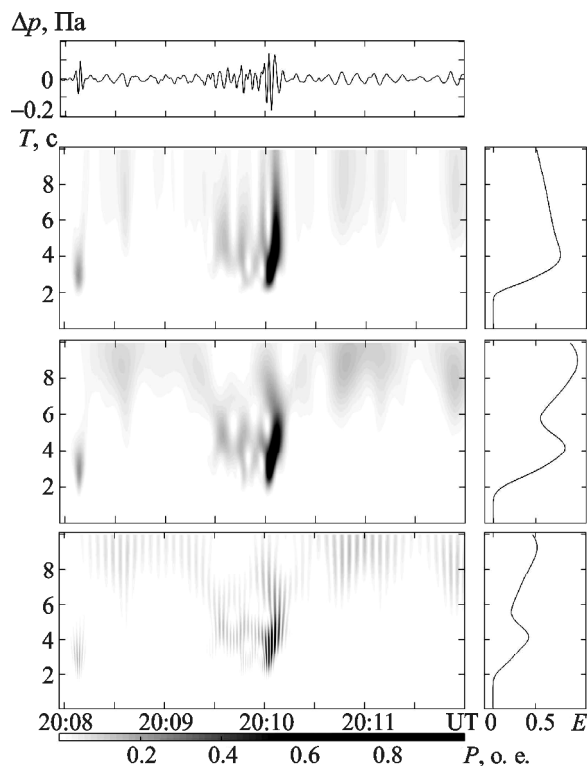


Рис. 9. Результаты полосовой фильтрации и ССА зависимости $\Delta p(t)$, зарегистрированной 26 сентября 2017 г. на станции “Балта”. Панели сверху вниз: волновая форма, результаты ОПФ, АПФ и ВП. Справа показаны энергограммы. Энерговыведение взрыва – 53 т ТНТ

сигнал с амплитудой в несколько раз меньшей, чем у основного. Ему соответствует скорость прихода около $245 \div 250$ м/с. Очевидно, что такую скорость имеют инфразвуковые волны, отражающиеся от термосферы [60].

Близость скоростей прихода, оцененных для трасс различной ориентации, при стратосферном отражении волн свидетельствует, что влияние ветра в верхней атмосфере на скорость инфразвука в это время года было малосущественным. Оценки скорости ветра по соотношениям, приведенным в работе [61], показали, что она не превышала единиц метров в секунду.

6. Основные результаты

Анализ параметров инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми химическими взрывами на арсенале боеприпасов вблизи г. Винница 26–27 сентября 2017 г., позволил установить следующее.

1. При увеличении энерговыведения от 3 до 53 т ТНТ наблюдалась тенденция к увеличению амплитуды (от 0.08 до 0.3 Па) и периода (примерно от 1 до 3 с) преобладающего колебания. Длительность цугов колебания при этом увеличивалась от ≈ 1.5 до 2 мин. Значение среднего квадрата амплитуды сигнала было примерно пропорционально энергии взрыва.

2. При небольшом изменении расстояния между эпицентром взрывов и месторасположением инфразвуковой станции (на $15 \div 18$ %) параметры инфразвукового сигнала изменялись незначительно. Различия в волновых формах были связаны с ориентацией трассы.

3. При энерговыведении, равном 53 т ТНТ, в спектре колебаний преобладали гармоники с периодом от 3 до $5 \div 6$ с. Длительность цугов колебаний с такими периодами составляла 40 с.

4. Средняя скорость прихода сигнала для различных трасс при стратосферном отражении волн изменялась в пределах $300 \div 309$ м/с, что свидетельствует о незначительном влиянии ветра в верхней атмосфере на распространение инфразвука. При термосферном отражении волн амплитуда сигнала была в несколько раз меньше, а скорость прихода составляла $245 \div 250$ м/с.

5. Оценка истинной средней скорости прихода инфразвукового сигнала при стратосферном отражении волн дала значение (303.5 ± 0.5) м/с и средней скорости стратосферного ветра – значение (6.8 ± 0.7) м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Le Pichon A., Blanc E., and Hauchecorne A. (eds.). *Infra-sound monitoring for atmospheric studies*. Dordrecht Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. 735 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5
2. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. Москва: Мир, 1978. 532 с.
3. Maeda K. and Young J. Propagation of pressure waves produced by auroras. *J. Geomag. Geoelectr.* 1966. Vol. 18, No. 2. P. 275–299. DOI: 10.5636/jgg.18.275
4. ReVelle D. O. On meteor generated infrasound. *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81, Is. 7. P. 1217–1230. DOI: 10.1029/JA081i007p01217
5. Brown P., Pack D., Edwards W. N., ReVelle D. O., Yoo B. B., Spalding R. E., and Tagliaferri E. The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.* 2004. Vol. 39, Is. 11. P. 1781–1796. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00075.x
6. Arrowsmith S. J., ReVelle D. O., Edwards W. N., and Brown P. Global detection of infrasonic signals from three

- large bolides. *Earth Moon Planets*. 2008. Vol. 102, Is. 1–4. P. 357–363. DOI: 10.1007/s11038-007-9205-z
7. ElGabry M. N., Korrat I. M., Hussein H. M., and Hamama I. H. Infrasonic detection of meteors. *NRIAG J. Astron. Geophys.* 2017. Vol. 6, Is. 1. P. 68–80. DOI: 10.1016/j.nrjag.2017.04.004
 8. Balachandran N. K. Infrasonic signals from thunder. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84, Is. C4. P. 1735–1745. DOI: 10.1029/JC084iC04p01735
 9. Georges T. M. Infrasonic signals from convective storms: Examining the evidence. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1973. Vol. 11, Is. 3. P. 571–594. DOI: 10.1029/RG011i003p00571
 10. Goerke V. H. and Woodward M. W. Infrasonic observation of a severe weather system. *Mon. Weather. Rev.* 1966. Vol. 94, Is. 6. P. 395–398. DOI: 10.1175/1520-0493(1966)094<0395:IOASW>2.3.CO;2
 11. Donn W. L. and Balachandran N. K. Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Air waves and explosive yield. *Science*. 1981. Vol. 213, No. 4507. P. 539–541. DOI: 10.1126/science.213.4507.539
 12. Garcés M., Iguchi M., Ishihara K., Morrissey M., Sudo Y., and Tsutsui T. Infrasonic precursors to a Vulcanian eruption at Sakurajima Volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26, Is. 16. P. 2537–2540. DOI: 10.1029/1998GL005327
 13. Bolt B. A. and Tanimoto T. Atmospheric oscillations after the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens. *EOS Trans. AGU*. 1981. Vol. 62, No. 23. P. 529–530. DOI: 10.1029/EO062i023p00529
 14. Ripepe M., Poggi P., Braun T., and Gordeev E. Infrasonic waves and volcanic tremor at Stromboli. *Geophys. Res. Lett.* 1996. Vol. 23, Is. 2. P. 181–184. DOI: 10.1029/95GL03662
 15. Edman D. A. and Selin R. A note on the Mount St. Helens volcanic eruption. *Mon. Weather Rev.* 1981. Vol. 109, Is. 5. P. 1103–1110. DOI: 10.1175/1520-0493(1981)109<1103:ANOTMS>2.0.CO;2
 16. Banister J. R. Pressure wave generated by the Mount St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89, Is. D3. P. 4895–4904. DOI: 10.1029/JD089iD03p04895
 17. Reed J. W. Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92, Is. D10. P. 11979–11992. DOI: 10.1029/JD092iD10p11979
 18. Le Pichon A., Herry P., Mialle P., Vergoz J., Brachet N., Garcés M., Drob D., and Ceranna L. Infrasonic associated with 2004–2005 large Sumatra earthquakes and tsunamis. *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, Is. 19. id. L19802. DOI: 10.1029/2005GL023893
 19. Donn W. L. and Ewing M. Atmospheric waves from nuclear explosions – Part II: The Soviet test of 30 October 1961. *J. Atmos. Sci.* 1962. Vol. 19, Is. 3. P. 264–273. DOI: 10.1175/1520-0469(1962)019<0264:AWFNEI>2.0.CO;2
 20. Donn W. L. and Ewing M. Atmospheric waves from nuclear explosions. *J. Geophys. Res.* 1962. Vol. 67, Is. 5. P. 1855–1866. DOI: 10.1029/JZ067i005p01855
 21. Donn W. L., Shaw D. M., and Hubbard A. C. The microbarograph detection of nuclear explosions. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1963. Vol. 10, Is. 1. P. 285–296. DOI: 10.1109/TNS.1963.4323271
 22. Che I. Y., Park J., Kim I., Kim T. S., and Lee H. I. Infrasonic signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophys. J. Int.* 2014. Vol. 198, Is. 1. P. 495–503. DOI: 10.1093/gji/ggu150
 23. Balachandran N. K., Donn W. L., and Rind D. H. Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science*. 1977. Vol. 197, No. 4298. P. 47–49. DOI: 10.1126/science.197.4298.47
 24. Donn W. L. Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde. *Am. Sci.* 1978. Vol. 66, Is. 6. P. 724–733.
 25. Le Pichon A., Garcés M., Blanc E., Barthélémy M., and Drob D. P. Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. *J. Acoust. Soc. Am.* 2002. Vol. 111, Is. 1. P. 629–641. DOI: 10.1121/1.1404434
 26. Evers L. Infrasonic monitoring in the Netherlands. *J. Netherlands Acoust. Soc. (Netherlands Akoestisch Genootschap)*. 2005. Vol. 176. P. 1–11.
 27. Donn W. L., Posmentier E., Fehr U., and Balachandran N. K. Infrasonic at long range from Saturn V, 1967. *Science*. 1968. Vol. 162, No. 3858. P. 1116–1120. DOI: 10.1126/science.162.3858.1116
 28. Balachandran N. K. and Donn W. L. Characteristics of Infrasonic Signals from Rockets. *Geophys. J. Int.* 1971. Vol. 26, Is. 1–4. P. 135–148. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1971.tb03387.x
 29. Olson J. Infrasonic rocket signatures. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. (September 11–14, 2012.). Maui, Hawaii, 2012. Vol. 1. P. 638–645.
 30. Спивак А. А., Кишкина С. Б., Локтев Д. Н., Рыбнов Ю. С., Соловьев С. П., Харламов В. А. Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН. *Сейсмические приборы*. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
 31. Спивак А. А., Локтев Д. Н., Рыбнов Ю. С., Соловьев С. П., Харламов В. А. Геофизические поля мегаполиса. *Геофизические процессы и биосфера*. 2016. Т. 15. № 2. С. 39–54.
 32. Адушкин В. В., Спивак А. А., Соловьев С. П., Перник Л. М., Кишкина С. Б. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2000. № 6. С. 554–563.
 33. Адушкин В. В., Горелый К. И. Доплеровское зондирование ионосферы над Югославией во время военных действий в Косово. *ДАН*. 2000. Т. 373, № 1. С. 87–89.
 34. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околосредней среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март–апрель 2003 г.). *Космична наука і технологія*. 2003. Т. 9, № 2/3. С. 13–33.
 35. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
 36. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске. *Геофизический журнал*. 2004. Т. 26, № 4. С. 31–44.
 37. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе

- вблизи г. Мелитополь. *Геофизический журнал*. 2004. Т. 26, № 6. С. 61–73.
38. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2006. № 6. С. 522–535.
39. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 4. С. 359–369.
40. Черногор Л. Ф. *Космос, Земля, человек: актуальные проблемы*. 2-е изд., доп. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2017. 384 с.
41. Черногор Л. Ф. Катастрофа на крупнейшем арсенале боеприпасов. *Наука и техника*. 2017. № 5 (132). С. 4–10.
42. Куличков С. Н. Дальнее распространение звука в атмосфере (Обзор). *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28, №4. С. 339–360.
43. Куличков С. Н., Авилов К. В., Буш Г. А., Попов О. Е., Распопов О. М., Барышников А. К., Ривелл Д. О., Уиткер Р. В. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40, № 1. С. 3–12.
44. Цыбульская Н. Д., Куличков С. Н., Чуличков А. И. Исследование возможности классификации инфразвуковых сигналов от разных источников. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48, № 4. С. 434–441.
45. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Дробжев В. И., Троицкая В. А., Федорович Г. В. Проект МАССА – исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 11. С. 5–8.
46. Альперович Л. С., Пономарев Е. А., Федорович Г. В. Моделируемые взрывом геофизические явления (Обзор). *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 11. С. 9–20.
47. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 11 (Специальный выпуск).
48. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. *Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу*. Москва: Наука, 2008. 295 с.
49. Таран В. И., Подъячий Ю. И., Смирнов А. Н., Герштейн Л. Я. Возмущения ионосферы после наземного взрыва по наблюдениям метода некогерентного рассеяния. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 11. С. 75–79.
50. Barry G. H., Griffiths L. J., and Taenzer J. C. HF radio measurements of high-altitude acoustic waves from a ground-level explosion. *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71, Is. 17. P. 4173–4182. DOI: 10.1029/JZ071i017p04173
51. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary. *Ann. Geophys.* 1985. Vol. 3, Is. 6. P. 673–687.
52. Blanc E. and Jacobson A. R. Observation of ionospheric disturbances following a 5-kt chemical explosion. 2. Prolongated anomalies and stratifications in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* 1989. Vol. 24, Is. 6. P. 739–746. DOI: 10.1029/RS024i006p00739
53. Blanc E. and Rickel D. Nonlinear wave fronts and ionospheric irregularities observed by HF sounding over a powerful acoustic source. *Radio Sci.* 1989. Vol. 24, Is. 3. P. 279–288. DOI: 10.1029/RS024i003p00279
54. Calais E., Minster B. J., Hofton M. A., and Hedlin M. A. H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophys. J. Int.* 1998. Vol. 132, Is. 1. P. 191–202. DOI: 10.1046/j.1365-246x.1998.00438.x
55. Fitzgerald T. J. Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 1997. Vol. 59, Is. 7. P. 829–834. DOI: 10.1016/S1364-6826(96)00105-8
56. Galperin Yu. I. and Hayakawa M. On the magnetospheric effects of experimental ground explosions observed from AUREOL-3. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1996. Vol. 48, Is. 10. P. 1241–1263. DOI: 10.5636/jgg.48.1241
57. Jacobson A. R., Carlos R. C., and Blanc E. Observation of ionospheric disturbances following a 5 kt chemical explosion. 1. Persistent oscillation in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* 1988. Vol. 23, Is. 5. P. 820–830. DOI: 10.1029/RS023i005p00820
58. Pokhotelov O., Parrot M., Fedorov E. N., Pilipenko V. A., Surkov V. V., and Gladyshev V. A. Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources. *Ann. Geophys.* 1995. Vol. 13, Is. 11. P. 1197–1210. DOI: 10.1007/s00585-995-1197-2
59. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т. 48, № 5. С. 681–702.
60. Edwards W. N. Meteor Generated Infrasonic: Theory and Observation. In: A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (eds.) *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Dordrecht: Springer, 2010. P. 361–414. DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5_12
61. Chernogor L. F. and Shevelev N. B. Parameters of the infrasonic signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2018. Vol. 34, No. 3. P. 147–160. DOI: 10.3103/S0884591318030030

REFERENCES

1. Le PICHON, A., BLANC, E. and HAUCHECORNE, A., eds., 2010. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Dordrecht Heidelberg, London, New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5
2. GOSSARD, E. E. and HOOKE, W. H., 1975. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publ. Co. Ink.
3. MAEDA, K. and YOUNG, J., 1966. Propagation of pressure waves produced by auroras. *J. Geomag. Geoelectr.* vol. 18, no. 2, pp. 275–299. DOI: 10.5636/jgg.18.275
4. REVELLE, D. O., 1976. On meteor generated infrasound. *J. Geophys. Res.* vol. 81, is. 7, pp. 1217–1230. DOI: 10.1029/JA081i007p01217
5. BROWN, P., PACK, D., EDWARDS, W. N., REVELLE, D. O., YOO, B. B., SPALDING, R. E. and TAGLIA-

- FERRI, E., 2004. The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.* vol. 39, is. 11, pp. 1781–1796. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00075.x
6. ARROWSMITH, S. J., REVELLE, D. O., EDWARDS W. N. and BROWN, P., 2008. Global detection of infrasonic signals from three large bolides. *Earth Moon Planets.* vol. 10, is. 1–4, pp. 357–363. DOI: 10.1007/s11038-007-9205-z
 7. ELGABRY, M. N., KORRAT, I. M., HUSSEIN, H. M. and HAMAMA, I. H., 2017. Infrasonic detection of meteors. *NRIAG J. Astron. Geophys.* vol. 6, is. 1, pp. 68–80. DOI: 10.1016/j.nrjag.2017.04.004
 8. BALACHANDRAN, N. K., 1979. Infrasonic signals from thunder. *J. Geophys. Res.* vol. 84, is. C4, pp. 1735–1745. DOI: 10.1029/JC084iC04p01735
 9. GEORGES, T. M., 1973. Infrasonic from convective storms: Examining the evidence. *Rev. Geophys. Space Phys.* vol. 11, is. 3, pp. 571–594. DOI: 10.1029/RG011i003p00571
 10. GOERKE, V. H. and WOODWAR, M. W., 1966. Infrasonic observation of a severe weather system. *Mon. Weather Rev.* vol. 94, is. 6, pp. 395–398. DOI: 10.1175/1520-0493(1966)094<0395:IOOASW>2.3.CO;2
 11. DONN, W. L. and BALACHANDRAN, N. K., 1981. Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Air waves and explosive yield. *Science.* vol. 213, no. 4507, pp. 539–541. DOI: 10.1126/science.213.4507.539
 12. GARCÉS, M., IGUCHI, M., ISHIHARA, K., MORRISSEY, M., SUDO, Y. and TSUTSUI, T., 1999. Infrasonic precursors to a Vulcanian eruption at Sakurajima Volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.* vol. 26, is. 16, pp. 2537–2540. DOI: 10.1029/1998GL005327
 13. BOLT, B. A. and TANIMOTO, T., 1981. Atmospheric oscillations after the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens. *EOS Trans. AGU.* vol. 62, no. 23, pp. 529–530. DOI: 10.1029/EO062i023p00529
 14. RIPEPE, M., POGGI, P., BRAUN, T. and GORDEEV, E., 1996. Infrasonic waves and volcanic tremor at Stromboli. *Geophys. Res. Lett.* vol. 23, is. 2, pp. 181–184. DOI: 10.1029/95GL03662
 15. EDMAN, D. A. and SELIN, R., 1981. A note on the Mount St. Helens volcanic eruption. *Mon. Weather Rev.* vol. 109, is. 5, pp. 1103–1110. DOI: 10.1175/1520-0493(1981)109<1103:ANOTMS>2.0.CO;2
 16. BANISTER, J. R., 1984. Pressure wave generated by the Mount St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.* vol. 89, is. D3, pp. 4895–4904. DOI: 10.1029/JD089iD03p04895
 17. REED, J. W., 1987. Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. *J. Geophys. Res.* vol. 92, is. D10, pp. 11979–11992. DOI: 10.1029/JD092iD10p11979
 18. Le PICHON, A., HERRY, P., MIALLE, P., VERGOZ, J., BRACHET, N., GARCÉS, M., DROB, D. and CERANN, L., 2005. Infrasonic associated with 2004–2005 large Sumatra earthquakes and tsunami. *Geophys. Res. Lett.* vol. 32, is. 18, id. L1802. DOI: 10.1029/2005GL023893.
 19. DONN, W. L. and EWING, M., 1962. Atmospheric waves from nuclear explosions – Part II: The Soviet test of 30 October 1961. *J. Atmos. Sci.* vol. 19, is. 3, pp. 264–273. DOI: 10.1175/1520-0469(1962)019<0264:AWFNEI>2.0.CO;2
 20. DONN, W. L. and EWING, M., 1962. Atmospheric waves from nuclear explosions. *J. Geophys. Res.* vol. 67, is. 5, pp. 1855–1866. DOI: 10.1029/JZ067i005p01855
 21. DONN, W. L., SHAW, D. M. and HUBBARD, A. C., 1963. The microbarograph detection of nuclear explosions. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* vol. 10, is. 1, pp. 285–296. DOI: 10.1109/TNS.1963.4323271
 22. CHE, I. Y., PARK, J., KIM, I., KIM, T. S. and LEE, H. I., 2014. Infrasonic signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophys. J. Int.* vol. 198, is. 1, pp. 495–503. DOI: 10.1093/gji/ggu150
 23. BALACHANDRAN, N. K., DONN, W. L. and RIND, D. H., 1977. Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science.* vol. 197, no. 4298, pp. 47–49. DOI: 10.1126/science.197.4298.47
 24. DONN, W. L., 1978. Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde. *Am. Sci.* vol. 66, is. 6, pp. 724–733.
 25. LE PICHON, A., GARCÉS, M., BLANC, E., BARTHÉLÉMY, M. and DROB, D. P., 2002. Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 111, is. 1, pp. 629–641. DOI: 10.1121/1.1404434
 26. EVERS, L. 2005. Infrasonic monitoring in the Netherlands. *J. Netherlands Acoust. Soc. (Netherlands Akoestisch Genootschap).* vol. 176, pp. 1–11.
 27. DONN W. L., POSMENTIER, E., FEHR, U. and BALACHANDRAN, N. K., 1968. Infrasonic at long range from Saturn V, 1967. *Science.* vol. 162, no. 3858, pp. 1116–1120. DOI: 10.1126/science.162.3858.1116
 28. BALACHANDRAN, N. K. and DONN, W. L., 1971. Characteristics of Infrasonic Signals from Rockets. *Geophys. J. Int.* vol. 26, is. 1–4, pp. 135–148. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1971.tb03387.x
 29. OLSON, J., 2012. Infrasonic rocket signatures. In: *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference Proceedings*. Maui, Hawaii, September 11-14, 2012. vol. 1, pp. 638–645.
 30. SPIVAK, A. A., KISHKINA, S. B., LOKTEV, D. N., RYBNOV, YU. S., SOLOVIEV, S. P. and KHARLAMOV, V. A., 2016. Instruments and techniques for megapolis geophysical monitoring and their application in the Moscow IDG RAS Geophysical Monitoring Center. *Seismicheskie Instrumenty.* vol. 52, № 2, pp. 65–78. (in Russian).
 31. SPIVAK, A. A., LOKTEV, D. N., RYBNOV, YU. S., SOLOVIEV, S. P. and KHARLAMOV, V. A., 2016. Geophysical fields of a megalopolis. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* vol. 52, is. 8, pp. 841–852. DOI: 10.1134/S0001433816080107
 32. ADUSHKIN, V. V., SPIVAK, A. A., SOLOVIEV, S. P., PERNIK, L. M. and KISHKINA, S. B., 2000. Geocological consequences of large chemical explosions in quarries. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya.* no. 6, pp. 554–563. (in Russian).
 33. ADUSHKIN, V. V. and GORELYI, K. I., 2000. Doppler sounding of the ionosphere above Yugoslavia during military operations in Kosovo. *Doklady Akademii Nauk.* vol. 373, no. 1, pp. 882–884. (in Russian).
 34. CHERNOGOR, L. F., 2003. Physical Processes in the Near-Earth Environment Associated with March–April 2003

- Iraq War. *Space Science and Technology*. vol. 9, is. 2/3, pp. 13–33. (in Russian).
35. CHERNOGOR, L. F., 2012. *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
 36. CHERNOGOR, L. F., 2004. Geophysical effects and geoeological consequences of mass chemical explosions in military warehouses in the city of Artemovsk. *Geofizicheskii Zhurnal*. vol. 26, no. 4, pp. 31–44. (in Russian).
 37. CHERNOGOR, L. F., 2004. Geophysical effects and environmental consequences of fire and explosions at a military base near the city of Melitopol. *Geofizicheskii Zhurnal*. vol. 26, no. 6, pp. 61–73. (in Russian).
 38. CHERNOGOR, L. F., 2006. Ecological consequences of mass chemical explosions in anthropogenic catastrophe. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. no. 6, pp. 522–535. (in Russian).
 39. CHERNOGOR, L. F., 2008. Geoeological consequences of the explosion of an ammunition depot. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. no. 4, pp. 359–369. (in Russian).
 40. CHERNOGOR, L. F., 2017. *Space, the Earth, Mankind: Contemporary Challenges*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
 41. CHERNOGOR, L. F., 2017. A catastrophe on the largest arsenal of ammunition. *Nauka i Tekhnologiya*. no. 5 (132), pp. 4–10. (in Russian).
 42. KULICHKOV, S. N., 1992. Long-range sound propagation in the atmosphere (Review). *Rossiiskaia Akademiia Nauk, Izvestiia, Fizika Atmosfery i Okeanovol*. vol. 28, no. 4, pp. 339–360. (in Russian).
 43. KULICHKOV, S. N., AVILOV, K. V., BUSH, G. A., POPOV, O. E., RASPOPOV, O. M., BARYSHNIKOV, A. K., REVELLE, D. O. and WHITAKER, R. W., 2004. On anomalously fast infrasonic arrivals at long distances from surface explosions. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. vol. 40, no. 1, pp. 1–9.
 44. TSYBUL'SKAYA, N. D., KULICHKOV, S. N. and CHULICHKOV, A. I., 2012. Studying possibilities for the classification of infrasonic signals from different sources. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. vol. 48, no. 4, pp. 384–390. DOI: 10.1134/S0001433812040147
 45. ALPEROVICH, L. S., GOKHBERG, M. B., DROBZHEV, V. I., TROITSKAYA, V. A. and FEDOROVICH, G. V., 1985. Project MASSA – A study of magnetospheric-atmospheric relations in seismo-acoustic phenomena. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. no. 11, pp. 5–8. (in Russian).
 46. ALPEROVICH, L. S., PONOMAREV, E. A. and FEDOROVICH, G. V., 1985. Geophysical phenomena modeling by explosion (Review). *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. no. 11, pp. 9–20. (in Russian).
 47. IZVESTIYA AN SSSR. FIZIKA ZEMLI, 1985. no. 11. (Thematical issue). (in Russian).
 48. GOKHBERG, M. B. and SHALIMOV, S. L., 2008. *Influence of earthquakes and explosions to ionosphere*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
 49. TARAN, V. I., POD'YACHII, YU. I., SMIRNOV, A. N. and GERSTEIN, L. J., 1985. Disturbances of the ionosphere after a ground level burst on supervision by a method of incoherent scatter. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. no. 11, pp. 75–79. (in Russian).
 50. BARRY, G. H., GRIFFITHS, L. J. and TAENZER, J. C., 1966. HF radio measurements of high-altitude acoustic waves from a ground-level explosion. *J. Geophys. Res.* vol. 71, is. 17, pp. 4173–4182. DOI: 10.1029/JZ071i017p04173
 51. BLANC, E., 1985. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary. *Ann. Geophys.* vol. 3, is. 6, pp. 673–687.
 52. BLANC, E. and JACOBSON, A. R., 1989. Observation of ionospheric disturbances following a 5-kt chemical explosion. 2. Prolongated anomalies and stratifications in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* vol. 24, is. 6, pp. 739–746. DOI: 10.1029/RS024i006p00739
 53. BLANC, E. and RICKEL, D., 1989. Nonlinear wave fronts and ionospheric irregularities observed by HF sounding over a powerful acoustic source. *Radio Sci.* vol. 24, is. 3, pp. 279–288. DOI: 10.1029/RS024i003p00279
 54. CALAIS, E., MINSTER, B. J., HOFSTON, M. A. and HEDLIN, M. A. H., 1998. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophys. J. Int.* vol. 132, is. 1, pp. 191–202. DOI: 10.1046/j.1365-246x.1998.00438.x
 55. FITZGERALD, T. J., 1997. Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 59, is. 7, pp. 829–834. DOI: 10.1016/S1364-6826(96)00105-8
 56. GALPERIN, YU. I. and HAYAKAWA, M., 1996. On the magnetospheric effects of experimental ground explosions observed from AUREOL-3. *J. Geomagn. Geoelectr.* vol. 48, is. 10, pp. 1241–1263. DOI: 10.5636/jgg.48.1241
 57. JACOBSON, A. R., CARLOS, R. C. and BLANC, E., 1988. Observation of ionospheric disturbances following a 5 kt chemical explosion. 1. Persistent oscillation in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* vol. 23, is. 5, pp. 820–830. DOI: 10.1029/RS023i005p00820
 58. POKHOTILOV, O., PARROT, M., FEDOROV, E. N., PILIPENKO, V. A., SURKOV, V. V. and GLADYCHEV, V. A., 1995. Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources. *Ann. Geophys.* vol. 13, is. 11, pp. 1197–1210. DOI: 10.1007/s00585-995-1197-2
 59. CHERNOGOR, L. F., 2008. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagn. Aeron.* vol. 48, no. 5, pp. 652–673. DOI: 10.1134/S0016793208050101
 60. EDWARDS, W. N., 2010. Meteor Generated Infrasound: Theory and Observation. In: A. LE PICHON, E. BLANC, and A. HAUCHECORNE, eds. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Dordrecht: Springer. pp. 361–414. DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5_12
 61. CHERNOGOR, L. F. and SHEVELEV, N. B., 2018. Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. vol. 34, no. 3, pp. 147–160. DOI: 10.3103/S0884591318030030

L. F. Chernogor, O. I. Liashchuk, and M. B. Shevelev

V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

PARAMETERS OF INFRASONIC SIGNALS GENERATED IN THE ATMOSPHERE BY MULTIPLE EXPLOSIONS AT AN AMMUNITION DEPOT

Purpose: The study lies in investigating the waveforms and the spectral content of the infrasonic signals generated by multiple explosions at an ammunition depot versus energy and distance. The aim of this study is investigating the features of the waveforms, amplitudes, and spectral content of the infrasonic signals which propagated over long distances (~150 to 180 km) from the ammunition depot near Vinnytsia (Ukraine) on September 26–27, 2017 during the man-caused catastrophe.

Design/methodology/approach: The Ukrainian network of infrasonic stations was used to study the basic parameters (spectral content, amplitudes, predominant oscillation periods, duration of the oscillation trains, celerity) of the infrasonic waves which propagated over long distances (~150 to 180 km). The signal processing technique in this study added up to the following. First, the time dependences of atmospheric pressure fluctuation acquired in relative units were converted into absolute units. Then, they were filtered within the period range of 0.2 to 10 s. Next, the filtered variations were subjected to the system spectral analysis that includes the short-time Fourier transform, the Fourier transform in a sliding window with a width adjusted to be equal to a fixed number of harmonic periods, and the wavelet transform. In the latter transform, the Morlet wavelet was used as the basis function.

Findings: It was shown that an upward trend in the amplitude and period of the predominant oscillation were observed when the energy release increased from 3 to 53 tons of TNT, while the duration of the oscillation trains increased from ~1.5 to 2 min. The infrasonic signal parameters were determined to change insignificantly when the distance between the explosion epicenter and an infrasonic station location changed a little (by 15 to 18 %). The differences in the wave forms are related to orientation of the propagation path. The analysis has revealed that the harmonics in the 3 to 5–6 s period range were predominant when the energy release was equal to 53 tons of TNT. The duration of the trains of oscillations with such periods amounted to 40 s. The average celerity was calculated to change within 300 to 309 m/s for different propagation paths with stratospheric wave reflections, that provides evidence for the influence of the wind in the upper atmosphere on the infrasound propagation. The thermospheric reflection resulted in the signal amplitude smaller by a factor of a few times and the celerity equal from 245 to 250 m/s.

Conclusions: The basic parameters of infrasonic signals generated during the recurrent explosions at the ammunition depot near Vinnytsia and propagating in the atmosphere have been studied.

Key words: infrasonic signals, multiple explosions, energy release, waveform, signal parameters, spectral content, celerity

Л. Ф. Черногор, О. І. Ляшчук, М. Б. Шевелев

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ПАРАМЕТРИ ІНФРАЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ В АТМОСФЕРІ, ЗГЕНЕРОВАНИХ МАСОВИМИ ВИБУХАМИ НА АРСЕНАЛІ БОЄПРИПАСІВ

Предмет і мета роботи: Предмет дослідження – залежність хвильових форм і спектрального складу інфразвукового сигналу, згенерованого масовими вибухами на арсеналі боеприпасів, від енерговиділення та відстані. Метою є вивчення особливостей хвильових форм інфразвукових сигналів, їх амплітуд і спектрального складу при дальньому (~150 ÷ 180 км) поширенні хвиль, згенерованих протягом техногенної катастрофи на арсеналі боеприпасів поблизу м. Вінниця 26–27 вересня 2017 р.

Методи і методологія: З використанням української мережі інфразвукових станцій вивчено основні параметри (спектральний склад, амплітуди, періоди переважаючих коливань, тривалість цугів коливань, швидкість приходу) інфразвукових хвиль при їх дальньому (~150 ÷ 180 км) поширенні. Методика обробки у цих дослідженнях зводилася до наступного. Спочатку результати вимірювань часових залежностей коливань атмосферного тиску переводилися з відносних одиниць в абсолютні. Потім вони піддавалися фільтрації в діапазоні періодів 0.2 ÷ 10 с. Потім здійснювався системний спектральний аналіз відфільтрованих залежностей за допомогою віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. З використанням вейвлет-перетворення у якості базисної функції використовувався вейвлет Морле.

Результати: Показано, що зі збільшенням енерговиділення від 3 до 53 т TNT спостерігалася тенденція до збільшення амплітуди та періоду переважаючого коливання. Тривалість цугів коливань при цьому збільшувалася від ~1.5 до 2 хв. Встановлено, що при невеликій зміні відстані (на 15 ÷ 18 %) між епіцентром вибухів і місцем розташування інфразвукової станції параметри інфразвукового сигналу змінювалися незначно. Відмінності у хвильових формах пов'язані з орієнтацією траси. Виявлено, що при енерговиділенні, рівному 53 т TNT, у спектрі коливань переважали гармоніки з періодом від 3 до 5 ÷ 6 с. Тривалість цугів коливань з такими періодами становила 40 с. Розраховано, що середня швидкість приходу для різних трас при стратосферному відображенні хвиль змінювалася у межах 300 ÷ 309 м/с, що свідчить про вплив вітру у верхній атмосфері на поширення інфразвуку. При термосферному відбитті хвиль амплітуда сигналу була у декілька разів меншою, а швидкість приходу становила 245 ÷ 250 м/с.

Висновок: Вивчено основні параметри інфразвукових сигналів, згенерованих впродовж повторюваних вибухів на військових складах поблизу м. Вінниця та поширюваних у атмосфері.

Ключові слова: інфразвукові сигнали, масові вибухи, енерговиділення, хвильові форми, параметри сигналу, спектральний склад, швидкості приходу

Статья поступила в редакцию 24.07.2018