

<https://doi.org/10.15407/knit2020.03.081>
УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. ЧЕРНОГОР¹

д-р физ.-мат. наук, проф.

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

А. И. ЛЯЩУК²

зам. нач. Глав. центра спец. контроля, канд. физ.-мат. наук, старш. исслед.

Н. Б. ШЕВЕЛЕВ¹

аспирант, мл. науч. сотруд.

¹ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

Площадь Свободы 4, Харьков, Украина, 61022

² Главный центр специального контроля НЦУИКС ГКА Украины

ул. Космическая 1, пгт. Городок, Радомышльский р-н, Житомирская обл., Украина, 12265

ВРЕМЕННОЙ И СИСТЕМНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗЫ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ, СГЕНЕРИРОВАННЫХ В ТЕЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ КАТАСТРОФЫ

Целью работы является изложение результатов наблюдения волновых форм и системного спектрального анализа инфразвуковых сигналов, сопровождавших массовые взрывы в течение сильнейшей техногенной катастрофы под г. Ичня, Черниговская обл., Украина, 9—10 октября 2018 г. На военных складах находилось около 69.5 тыс. т боеприпасов. Площадь арсенала — 682 га. Его географические координаты: 50°51'45" с. ш., 32°23'39" в. д. Для наблюдения использовались инфразвуковые и сейсмические станции Главного центра специального контроля НЦУИКС ГКА Украины. Инфразвуковая станция Малин оборудована микробарографом, функционирующим в диапазоне частот 0.3...10 Гц. Методика обработки данных наблюдений в настоящих исследованиях сводилась к следующему. Сначала результаты измерений временных зависимостей давления в инфразвуковой волне переводились из относительных единиц в абсолютные. Далее эти зависимости подвергались фильтрации в диапазоне периодов 0.2...5 с. Затем осуществлялся системный спектральный анализ отфильтрованных зависимостей давления в инфразвуковой волне при помощи взаимодополняющих оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования с использованием базисной функции Морле. Изучены особенности волновых форм инфразвуковых сигналов, их амплитуд и спектрального состава при дальнем (218 км) распространении волн, сгенерированных в течение техногенной катастрофы на арсенале боеприпасов. Показано, что при увеличении энерговыделения от 4.1 до 49.9 т ТНТ наблюдалась тенденция к увеличению амплитуды и периода преобладающего колебания. Длительность цугов колебания при этом увеличивалась от 2.5 до 7 с. Выявлено, что при энерговыделении, равном 49.9 т ТНТ, в спектре колебаний преобладали гармоники с периодами от 1 до 2 с. Рассчитано, что средняя скорость прихода волн изменялась в пределах 300...333 м/с. Построены основные корреляционные поля.

Ключевые слова: техногенная катастрофа, инфразвуковой сигнал, основные параметры сигнала, временные формы, системный спектральный анализ, корреляционное поле, регрессия.

Цитування: Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Временной и системный спектральный анализы инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных в течение техногенной катастрофы. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 3 (124). С. 81—96. <https://doi.org/10.15407/knit2020.03.081>

ВВЕДЕНИЕ

С целью изучения прямых и обратных, положительных и отрицательных связей между подсистемами системы Земля (внутренние оболочки) — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) проводятся активные эксперименты. Одной из разновидностей активных экспериментов является воздействие на систему ЗАИМ мощным химическим взрывом. Классическим примером такого активного эксперимента с энерговыделением в 260 т ТНТ был специальный проект МАССА [2, 6]. При этом было изучено действие на указанную систему отдельного мощного взрыва. Другими примерами с воздействием мощных одиночных химических взрывов на околоземную среду являются активные эксперименты с различным энерговыделением: 1 кт ТНТ, описанные в работе [5], 1.5 кт ТНТ в работе [23], 2 кт ТНТ в работе [27] и 5 кт ТНТ в работе [29].

В работе [7] для исследования распространения инфразвука в атмосфере Земли применялись относительно слабые (1...100 кг ТНТ) одиночные химические взрывы.

Теория физических процессов в подсистемах системы ЗАИМ, вызванных мощным химическим взрывом, затем была развита в ряде работ [4, 6, 7—9, 17]. Доказано, что мощный химический взрыв воздействует на все геосферы. Он генерирует сейсмические волны в литосфере, электрические возмущения, магнитные возмущения, электромагнитное излучение, акустико-гравитационные волны (АГВ) в атмосфере, перемещающиеся ионосферные возмущения, МГД-волны в геокосмической плазме [2, 6, 18, 19].

Установлено, что реакция околоземной среды на массовые, но относительно слабые химические взрывы, на сегодняшний день изучена недостаточно. Лишь отдельные работы посвящены подобным исследованиям. Массовые взрывы имеют место при карьерных разработках полезных ископаемых [1], в течение военных действий [11], а также при авариях и катастрофах на военных складах [12—14, 16, 17].

Важно, что массовые химические взрывы сопровождаются пожарами, которые сами по себе являются источниками АГВ, электрических и магнитных возмущений и электромагнитных

Таблица 1. Сейсмические данные о сериях взрывов 9—10 октября 2018 г.

№	09.10.2018 киевское время	Магнитуда (по шкале Рихтера)	Расчетная мощность, т ТНТ
1	03:38:25	1.98	17.0
2	03:51:27	1.75	9.9
3	03:55:11	1.67	8.4
4	04:01:23	2.45	49.9
5	04:04:30	1.12	2.3
6	04:06:05	2.00	17.5
7	04:09:06	0.50	0.6
8	04:16:28	1.48	5.4
9	04:18:42	2.21	29.1
10	04:21:31	1.54	6.1
11	04:27:16	1.00	1.8
12	04:28:49	2.17	26.3
13	04:30:04	2.09	22.0
14	04:30:20	1.72	9.3
15	04:31:41	1.91	14.4
16	04:35:10	0.97	1.7
17	04:35:21	1.27	3.3
18	04:39:24	0.22	0.3
19	04:40:57	1.40	4.5
20	04:42:08	2.40	44.4
21	04:44:01	1.04	2.0
22	04:51:40	2.01	18.2
23	05:18:45	1.50	5.6
24	05:31:43	1.58	6.7
25	05:35:31	2.06	20.3
26	05:40:18	1.37	4.1
27	05:45:38	1.63	7.5
28	06:05:39	1.0	1.8
29	06:06:21	1.87	13.2
30	06:06:26	2.02	18.5
31	06:13:55	1.71	9.2
32	06:16:41	1.41	4.6
33	06:38:51	2.05	19.9
34	06:52:28	0.26	0.3
35	07:29:03	0.96	1.6
36	10:24:02	0.99	1.7
37	11:19:40	2.0	17.9
38	12:12:12	1.23	3.0
39	12:45:16	1.08	2.2
40	13:09:24	0.99	1.8
41	13:10:44	0.99	1.8
42	14:03:12	0.79	1.1
43	15:20:34	1.33	3.8
44	17:19:56	0.75	1.0
45	14:50:08 (10.10.2018)	0.77	1.0



Рис. 1. Примеры взрывов и их последствий

излучений. Более того, имеет место синергетическое взаимодействие процессов, вызванных повторяющимися взрывами и пожарами [17].

Физические эффекты и экологические последствия массовых химических взрывов и сопутствующих пожаров обсуждаются в работах [12—14, 16—19]. Основной вывод этих работ заключается в том, что реакция на такое воздействие в той или иной степени может проявляться во всех подсистемах системы ЗАИМ.

Основной эффект массовых химических взрывов заключается в генерации взрывных волн, которые на достаточно больших расстояниях трансформируются в инфразвуковые волны. Особенности распространения таких волн в условиях повторяющихся взрывов, сопровождаемых пожарами, изучены недостаточно [19, 21, 22, 24—26]. В тезисах [21, 22, 24—26] перечислены предварительные результаты исследования инфразвуковых эффектов, сопровождавших техногенную катастрофу вблизи г. Винница 26—27 сентября 2017 г. В работе [19] эти эффекты описаны более подробно.

Нет двух одинаковых катастроф. Нет одинаковых условий для генерации и распространения инфразвуковых волн, производимых массовыми взрывами на военных складах. Поэтому представляет значительный интерес изучение инфразвуковых эффектов для каждой крупной катастрофы.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения волновых форм, системного спектрального и статистического анализов инфразвуковых сигналов, сопровождавших массовые взрывы в течение сильнейшей техногенной катастрофы под г. Ичня, Украина 9—10 октября 2018 г.

Предварительные результаты исследований опубликованы в работах [20, 27, 28].

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОГЕННОЙ КАТАСТРОФЕ

На военных складах, дислоцированных вблизи г. Ичня, Черниговская обл., Украина, находилось около 69,5 тыс. т боеприпасов (около 3 тыс. условных вагонов). Площадь арсенала — 682 га. Его географические координаты: 50°51'45" с. ш., 32°23'39" 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...5 км.

Первая серия массовых взрывов с энерговыделением в 17 т ТНТ прогремела 9 октября 2018 г. в 00:38:25 UT. Массовые взрывы прекратились лишь 10 октября в 11:50:08 UT. Всего отмечено 45 серий массовых взрывов. Их энерговыделение изменялось от 0,1 до 49,9 т ТНТ (табл. 1). Суммарное энергосодержание на арсенале составляло около 30 кт ТНТ. Прореагировала лишь часть всех боеприпасов. Взрывы сопровождались масштабными пожарами (рис. 1). Высота пламени достигала 100...150 м, а высота подъема нагретых продуктов — нескольких километров.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Для наблюдения использовались измерительные средства Главного центра специального контроля НЦУИКС ГКА Украины. К ним, в частности, относятся инфразвуковые и сейсмические станции. Инфразвуковая станция Малин (географические координаты 50.70° с. ш., 29.22° в. д.) оборудована микробарографом, функцио-

нирующим в диапазоне частот 0.3...10 Гц. Диапазон измеряемых вариаций давления микробарографа составлял 0.01...100 Па. Станция Малин, удаленная от арсенала на 218 км, имеет три канала регистрации инфразвуковых сигналов.

Для определения моментов взрывов и оценки их интенсивности использовались измерения на 24-элементной сейсмической станции PS45 Международной системы мониторинга, дислоцированной возле г. Малин (см. табл. 1). Из таблицы видно, что энерговыделение при взрывах изменялось от 0.1 до 49.9 т ТНТ. Погрешность оценки магнитуды землетрясения не превышала 0.1, а энергии взрыва — 23 %.

Сигнал от взрывов идентифицировался по известному из расчетов азимуту источника, по результатам многоканальной корреляции и по оцененной скорости прихода инфразвукового сигнала. Добавим, что расчетный азимут составлял 84.5° , а измеряемый — $74.3 \pm 7.6^\circ$.

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...5 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) с использованием базисной функции Морле [15]. Как известно, ОПФ обладает лучшим разрешением по времени, АПФ — по периоду. Вейвлет-преобразования, как известно, имеет свойства математического микроскопа [3]. Оно позволяет «уравнять шансы» колебаний с разными периодами. Далее строились корреляционные поля и регрессии основных параметров инфразвукового сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВРЕМЕННОГО И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗОВ

Пример временных зависимостей давления в инфразвуковой волне от энерговыделения при взрывах приведен на рис. 2. Из рис. 2 видно, что волновая форма инфразвукового сигнала замет-

Таблица 2. Акустические данные о сериях взрывов

Энерговыделение взрыва, т ТНТ	Время прихода сигнала, UT	Скорость прихода, м/с	Диапазон периодов, с	A , град
4.1	02:51:15	332	0.25...1.05	70...80
4.5	01:53:03	300	0.27...1.07	70...80
4.6	03:27:37	332	0.28...1.08	70...80
5.6	02:29:41	332	0.32...1.12	70...80
6.7	02:42:38	333	0.37...1.17	70...80
7.5	02:56:33	333	0.40...1.20	70...80
9.2	03:24:51	332	0.45...1.25	60...70
17.0	00:50:04	314	0.65...1.45	70...80
18.2	02:02:38	331	0.67...1.47	60...70
20.3	02:46:27	332	0.71...1.51	70...80
22.0	01:40:58	333	0.74...1.54	70...80
26.3	01:39:46	332	0.81...1.61	60...70
29.1	01:29:39	332	0.85...1.65	80...90
44.4	01:53:07	331	1.04...1.84	80...90
49.9	01:12:20	332	1.10...1.90	70...80

Таблица 3. Общие сведения о параметрах инфразвуковых сигналов, зарегистрированных на станции МААГ 2 от взрывов с различными энерговыделениями

E , кт ТНТ	ΔT , с	T , с	Δp_{\max} , Па	$\overline{\Delta p^2}$, Па ²
4.1	2.98 (3.60)	0.80, 0.45	1.85	0.85 (0.76)
4.5	5.83 (5.76)	0.85, 0.50, 0.30	1.52	1.63 (0.38)
4.6	3.70 (4.32)	0.65	3.95	3.07 (2.82)
5.6	2.98 (2.52)	0.45	1.70	1.17 (0.82)
6.7	4.13 (4.68)	0.45	2.53	1.26 (0.95)
7.5	3.55 (4.32)	0.80, 0.45	2.31	1.20 (0.79)
9.2	4.50 (5.76)	0.83	2.96	3.25 (1.68)
17.0	3.75 (3.60)	1.23	1.11	0.72 (0.36)
18.2	6.08 (6.48)	1.30	0.75	0.81 (0.12)
22.0	7.78 (6.12)	1.43	1.74	1.96 (0.68)
20.3	4.02 (3.60)	0.80	1.16	2.12 (0.39)
26.3	6.10 (6.84)	1.48	1.35	1.36 (0.46)
29.1	5.00 (5.06)	1.43	1.35	1.01 (0.42)
44.4	6.05 (6.66)	1.53	1.76	1.59 (0.76)
49.9	7.40 (7.20)	1.45	3.70	5.56 (2.62)

Примечание. Длительности инфразвуковых сигналов определены по волновым формам и оконному преобразованию Фурье (в скобках).

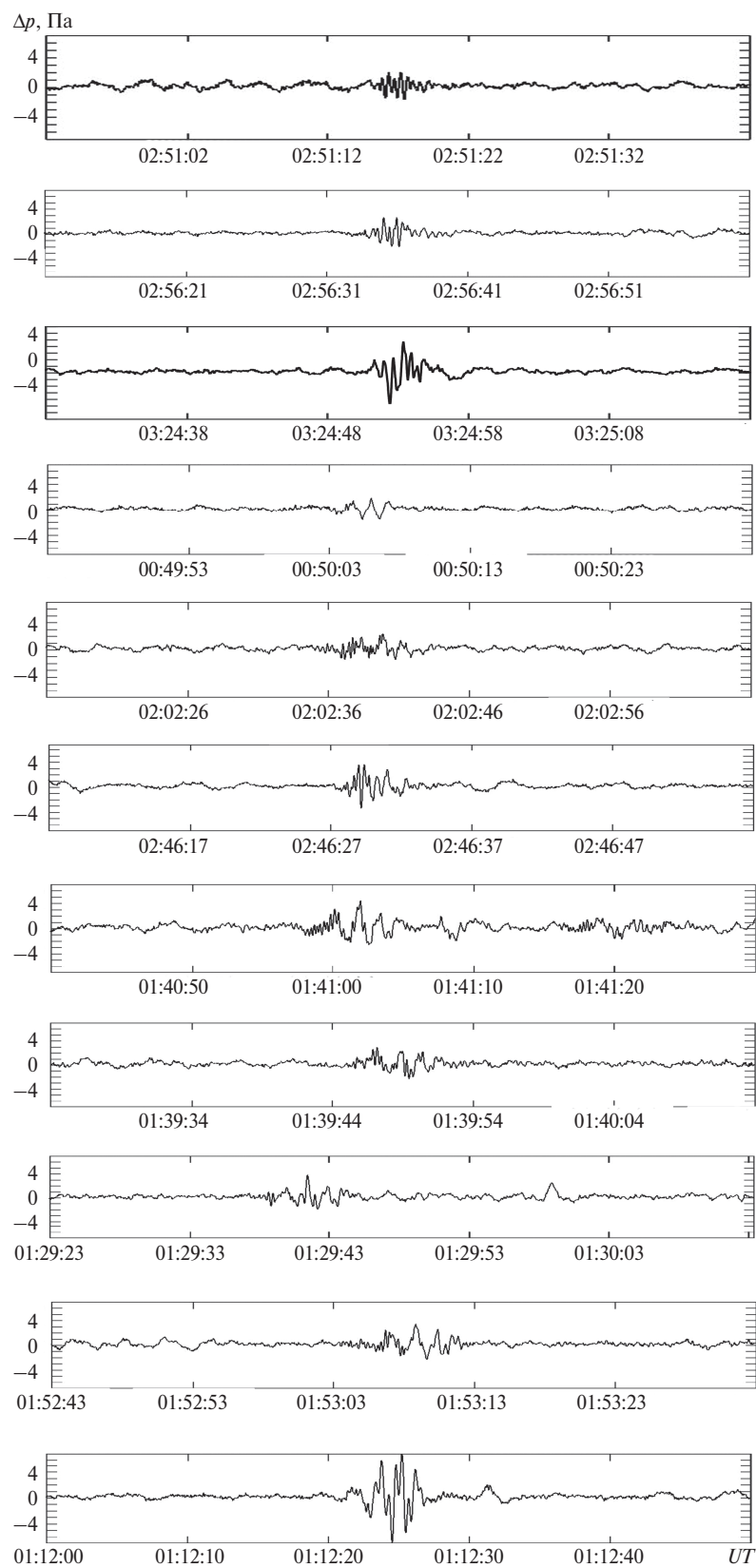


Рис. 2. Исходные волновые формы инфразвуковых сигналов 9 октября 2018 г., сгенерированных взрывами с энерговыделениями: 4.1, 7.5, 9.2, 17.0, 18.2, 20.3, 22.0, 26.3, 29.1, 44.4, 49.9 т ТНТ (панели сверху вниз)

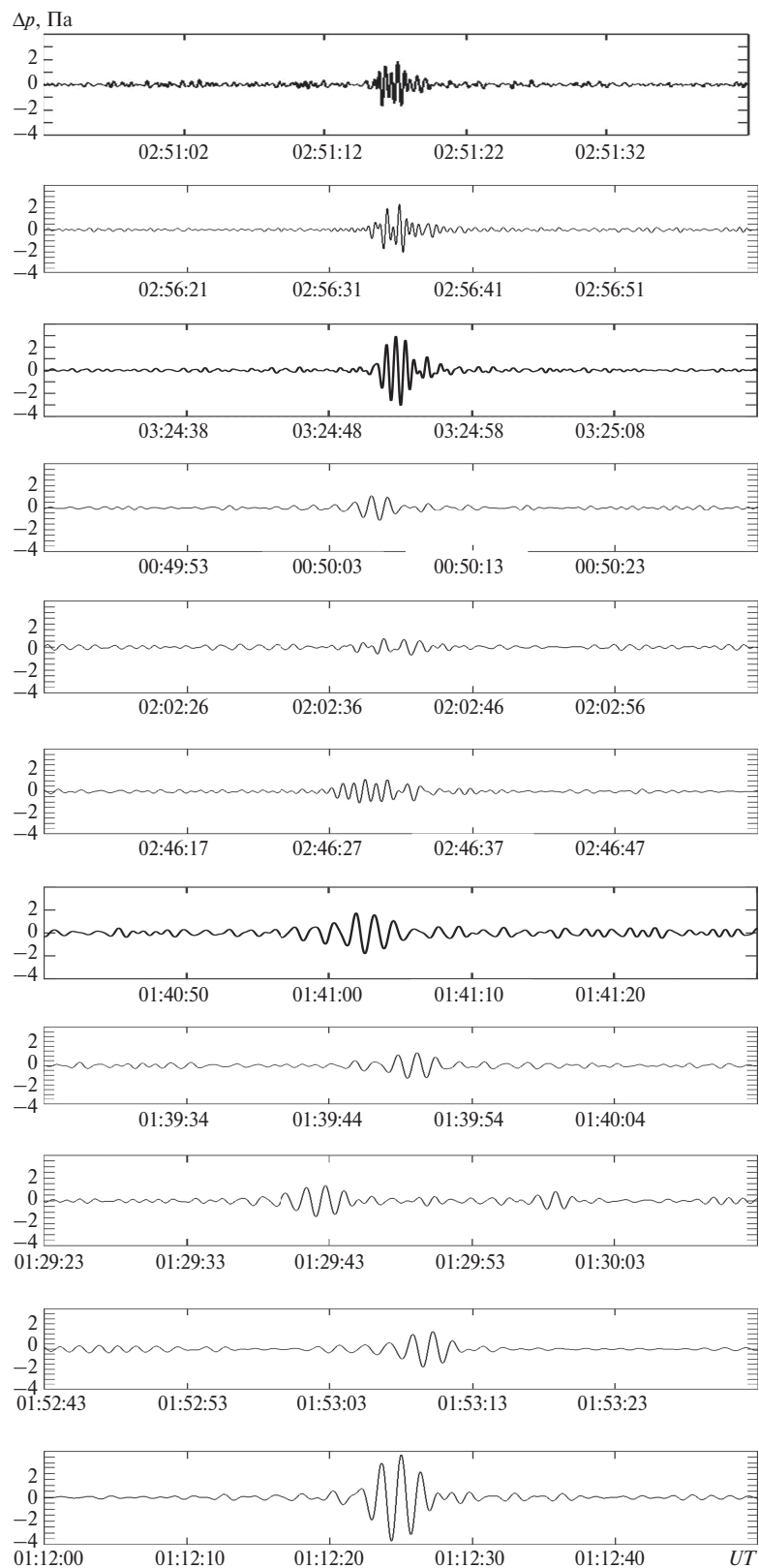


Рис. 3. Отфильтрованные в диапазоне периодов 0.1...1.5 с волновые формы инфразвуковых сигналов 9 октября 2018 г., сгенерированных взрывами с энерговыделениями 4.1, 7.5, 9.2, 17.0, 18.2, 20.3, 22.0, 26.3, 29.1, 44.4, 49.9 т ТНТ (панели сверху вниз)

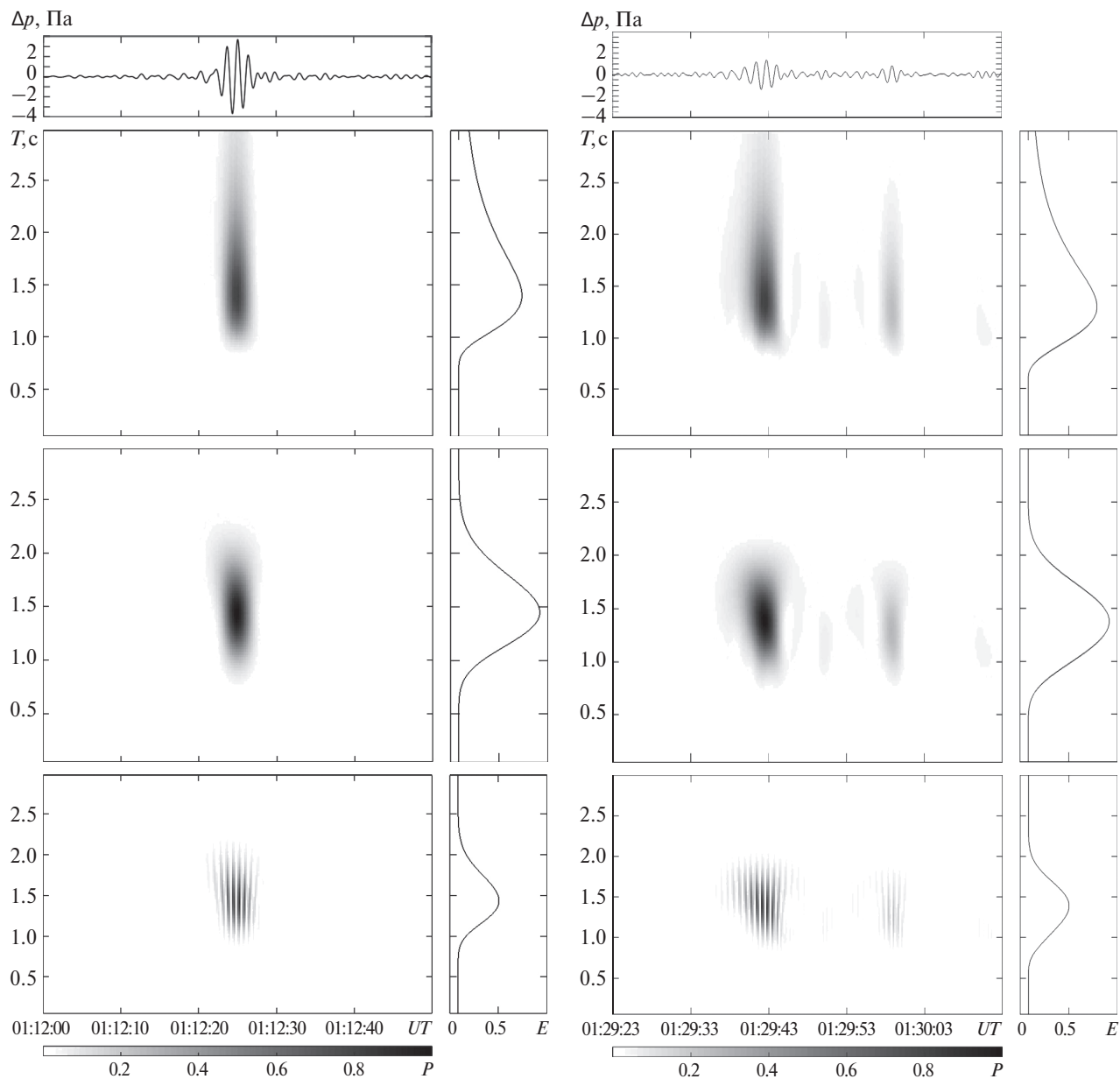


Рис. 4. Результаты ССА инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом с энерговыведением 49.9 т ТНТ в 01:01:23 UT 9 октября 2018 г. Здесь и далее панели сверху вниз: исходный сигнал, результаты ОПФ, АПФ и ВП. Справа показаны энергограммы (распределение энергии сигнала по периодам)

Рис. 5. Результаты ССА инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом с энерговыведением 29.1 т ТНТ в 01:18:42 UT 9 октября 2018 г.

но искажается шумами. Для их устранения применялась полосовая (диапазон периодов 0.2... 5 с) фильтрация.

Волновые формы инфразвуковых сигналов после фильтрации показаны на рис. 3. Из рис. 3

видно, что при уменьшении энерговыведения от 49.9 до 4.1 т ТНТ период основного колебания постепенно уменьшается от 1.5 до 0.5 с. Инфразвуковой сигнал при различных энерговыведениях содержит пять колебаний общей длитель-

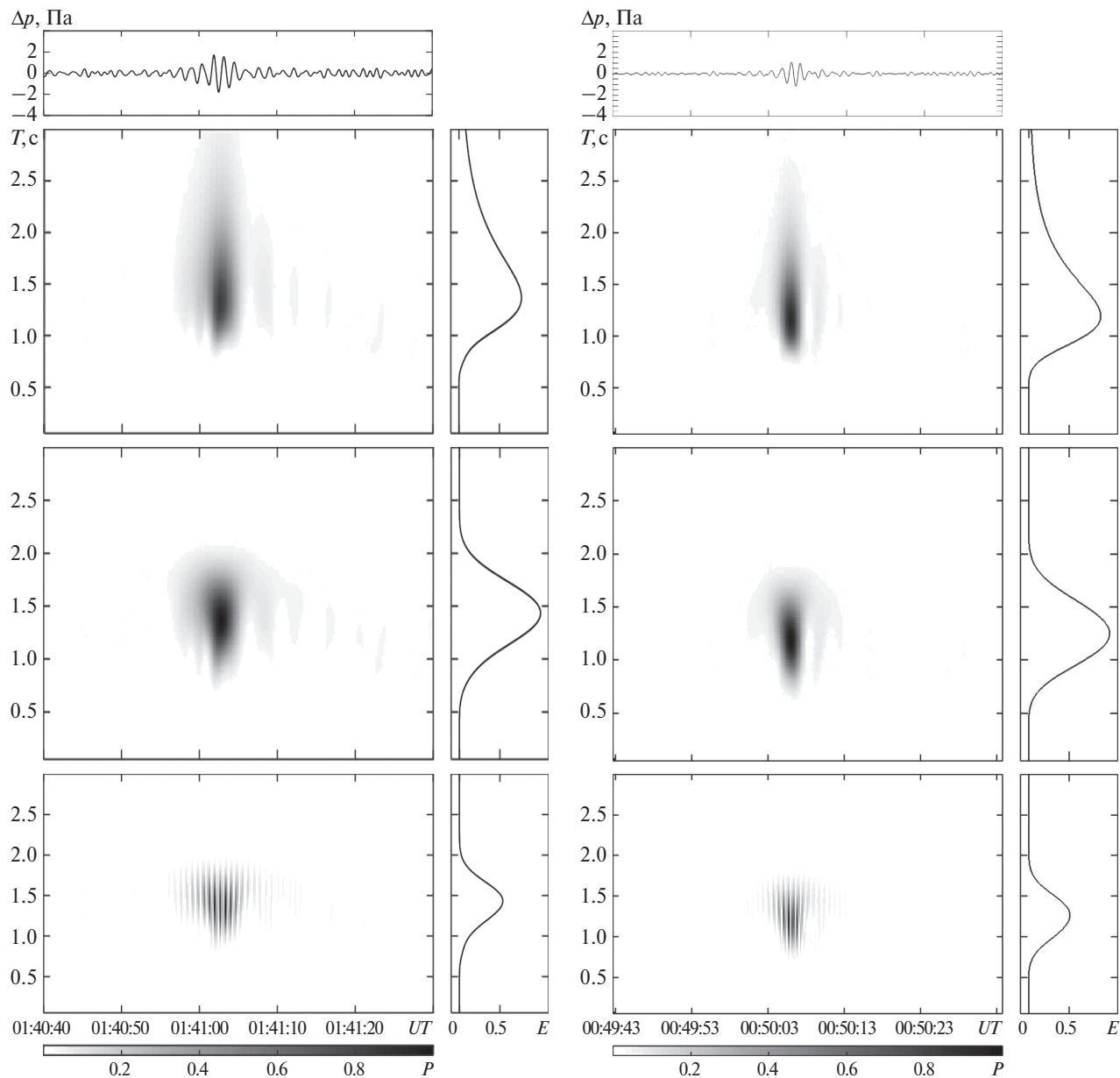


Рис. 6. Результаты ССА инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом с энерговыведением 22.0 т ТНТ в 01:30:04 UT 9 октября 2018 г.

Рис. 7. Результаты ССА инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом с энерговыведением 17.0 т ТНТ в 00:38:25 UT 9 октября 2018 г.

ностью 5...7 с. С уменьшением энерговыведения средний квадрат амплитуды давления в волне, точнее, его произведение на длительность сигнала, уменьшается примерно пропорционально значению выделенной энергии.

Зная расстояние между местом катастрофы и местом регистрации, а также время запаздывания инфразвукового сигнала, можно рассчитать скорость прихода инфразвуковой волны. Результаты расчетов приведены в табл. 2, 3. Из табл. 2, 3 видно,

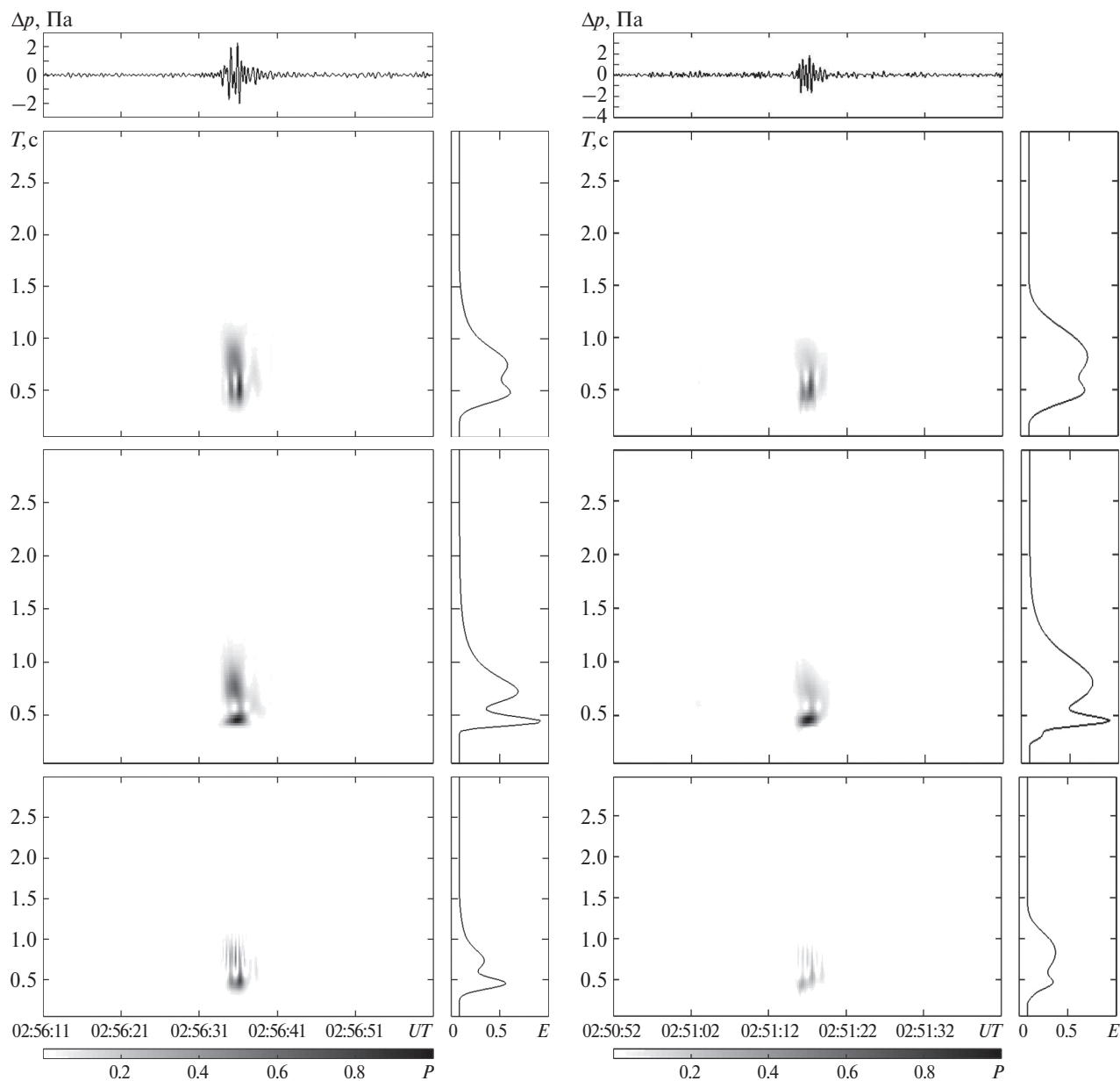


Рис. 8. Результаты ССА инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом с энерговыведением 7.5 т ТНТ в 02:45:38 UT 9 октября 2018 г.

Рис. 9. Результаты ССА инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом с энерговыведением 4.1 т ТНТ в 02:40:18 UT 9 октября 2018 г.

что скорость прихода изменяется от 310 до 333 м/с, основной период — от 0.40 до 1.55 с, амплитуда Δp — от 0.75 до 3.7 Па, а азимут A — от 70° до 90°.

На рис. 4—9 приведены результаты ССА для различных энерговыведений. Видно, что инфразвуковой сигнал достаточно четко локализу-

ется по времени и по периодам. Как и следовало ожидать, при уменьшении энерговыведения значение основного периода колебания уменьшается. Применение ОПФ и АПФ позволило улучшить разрешение по времени и периоду соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Корреляционное поле «длительность сигнала ΔT_{WF} — длительность сигнала ΔT_{SFT} ». Длительность сигнала ΔT определялась по двум методикам: по волновым формам (ΔT_{WF}) и по результатам ОПФ (ΔT_{SFT}). Соответствующее корреляционное поле приведено на рис. 10.

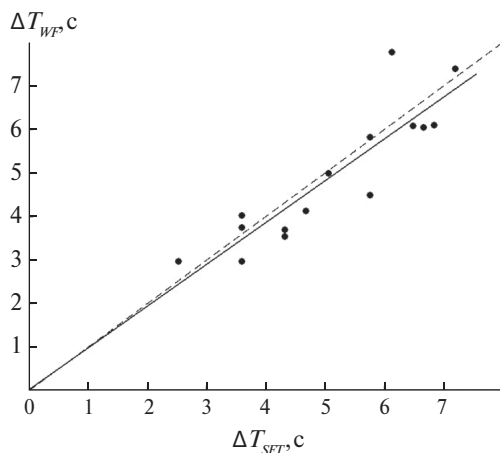


Рис. 10. Зависимость длительности сигнала, определенной по волновым формам (ΔT_{WF}), от длительности сигнала, определенной с помощью методики ОПФ (ΔT_{SFT}). Аппроксимация линейной зависимостью вида $\Delta T_{WF} = 0.96\Delta T_{SFT} + 0.02$, коэффициент достоверности аппроксимации $R \approx 0.94$, среднеквадратичное отклонение $\sigma \approx 0.71$ с. Пунктирной линией показана аппроксимация в случае совпадения длительностей, определенных при различных методиках ($R = 1.00$)

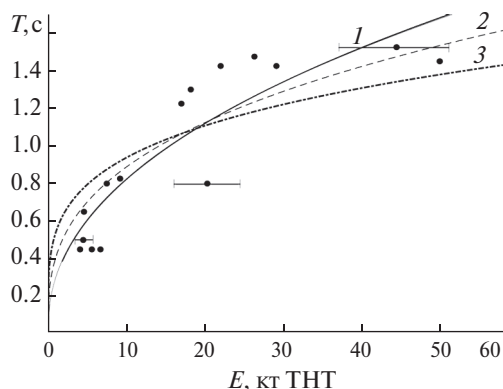


Рис. 11. Зависимость периода основного колебания от энерговыделения взрыва. Аппроксимация степенным законом: 1 — $T = 0.30E^{0.44}$, $R \approx 0.90$, $\sigma \approx 0.19$ с; 2 — $T = 0.41E^{0.34}$, $R \approx 0.88$, $\sigma \approx 0.21$ с; 3 — $T = 0.54E^{0.24}$, $R \approx 0.80$, $\sigma \approx 0.26$ с

Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$\Delta T_{WF} = 0.96\Delta T_{SFT} + 0.02. \quad (1)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации $R \approx 0.94$, среднее квадратичное отклонение $\sigma \approx 0.71$ с.

Корреляционное поле «период — энергия взрыва». Период оценивался при помощи АПФ. Соответствующее корреляционное поле и зависимость $T(E)$ показаны на рис. 11. Использовались следующие три регрессии:

$$T = 0.30E^{0.44}, R \approx 0.90, \sigma \approx 0.19 \text{ с}; \quad (2)$$

$$T = 0.41E^{0.34}, R \approx 0.88, \sigma \approx 0.21 \text{ с}; \quad (3)$$

$$T = 0.54E^{0.24}, R \approx 0.80, \sigma \approx 0.26 \text{ с}. \quad (4)$$

Корреляционное поле «длительность сигнала — энергия взрыва». Соответствующее поле приведено на рис. 12. Видно, что имеет место значительный разброс точек. Регрессионные зависимости имеют вид

$$\Delta T_{SFT} = 0.06E + 3.97, R \approx 0.64, \sigma \approx 1.14 \text{ с}; \quad (5)$$

$$\Delta T_{SFT} = 2.96E^{0.21}, R \approx 0.62, \sigma \approx 1.16 \text{ с}; \quad (6)$$

$$\Delta T_{WF} = 0.07E + 3.63, R \approx 0.68, \sigma \approx 1.17 \text{ с}; \quad (7)$$

$$\Delta T_{WF} = 2.52E^{0.25}, R \approx 0.68, \sigma \approx 1.16 \text{ с}. \quad (8)$$

Корреляционное поле «средний квадрат амплитуды волны — энергия взрыва». В силу закона сохранения энергии при увеличении энергии взрыва увеличивается не только амплитуда инфразвуковой волны Δp , но и длительность сигнала. Корреляционное поле « $\overline{\Delta p^2 \Delta T} - E$ » показано на рис. 13. Наблюдается заметный разброс точек. Уравнения регрессий имеют вид

$$\overline{\Delta p^2 \Delta T_{WF}} = 0.38E^{1.07}, R \approx 0.59, \sigma \approx 8.06 \text{ Па}^2\text{с}; \quad (9)$$

$$\overline{\Delta p^2 \Delta T_{SFT}} = 1.49E^{0.43}, R \approx 0.25, \sigma \approx 5.00 \text{ Па}^2\text{с}. \quad (10)$$

ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема генерации и распространения инфразвуковых волн в атмосфере в течение техногенной катастрофы на военных складах как в экспериментальном, так и в теоретическом планах по-прежнему остается малоизученной. Результатам исследования параметров инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми химическими взрывами на арсенале бое-

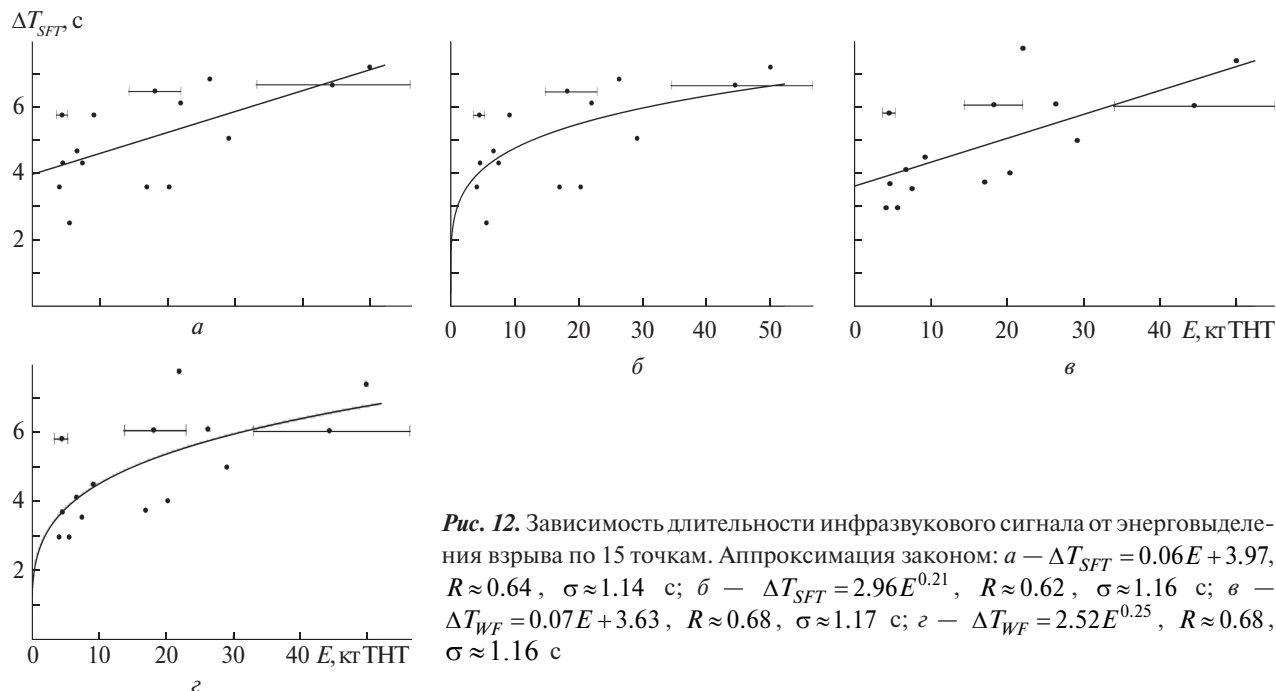
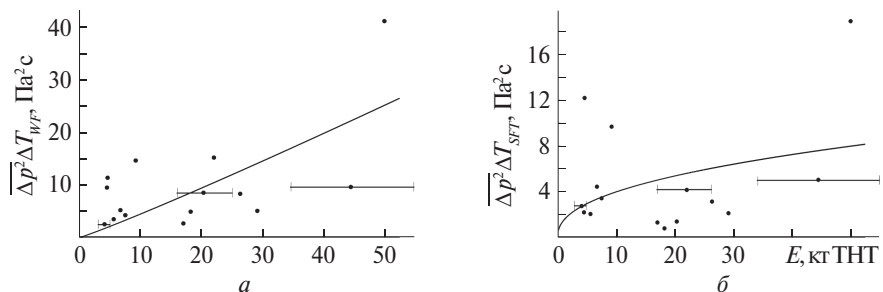


Рис. 13. Зависимость произведения $\Delta p^2 \Delta T_{SFT}$ от энерговыделения взрыва. Аппроксимация законом: $a - \Delta p^2 \Delta T_{WF} = 0.38E^{1.07}$, $R \approx 0.59$, $\sigma \approx 8.06$ Па²·с; $б - \Delta p^2 \Delta T_{SFT} = 1.49E^{0.43}$, $R \approx 0.25$, $\sigma \approx 5.00$ Па²·с



припасов вблизи г. Винница 26—27 сентября 2017 г., посвящены лишь отдельные работы [19, 21, 22, 24, 26]. Результаты теоретических исследований суммированы в монографии [17]. В отличие от работы [19], в настоящей статье, кроме ССА для всех основных энерговыделений, построены различные корреляционные поля. Эти результаты существенно дополняют результаты работы [19].

Есть целый ряд сложностей в исследовании инфразвуковых волн, сгенерированных во время катастроф на военных складах. Во-первых, массовые взрывы происходят на фоне интенсивных пожаров, которые также являются источниками АГВ в широком диапазоне периодов, включающих в себя и инфразвуковые волны (периоды

0.05...300 с). Исследование параметров этих волн представляет самостоятельный интерес. Во-вторых, возникающие при повторяющихся взрывах возмущения в системе ЗАИМ и в атмосфере, в частности, накапливаются над местом катастрофы. В результате образуется своеобразный «купол», параметры которого могут значительно отличаться от параметров невозмущенной среды. В-третьих, «купол» может заметно влиять на условия преломления инфразвука и его захвата в атмосферные волноводы. Наконец, сила взрывов разная, последовательность их энерговыделения во времени является случайной. Всё это определяет интенсивность и спектральный состав инфразвуковых сигналов, генерируемых в

течение массовых химических взрывов на арсеналах боеприпасов.

Экспериментальная оценка азимута источника инфразвуковых волн, межканальная корреляционная обработка и оценка скорости прихода волн позволили надежно выделить из всей регистрируемой совокупности инфразвуковые сигналы, зарегистрированные массовыми химическими взрывами. При этом для оценки энергии взрывов и моментов времени привлекались данные сейсмографов, расположенных вблизи инфразвуковой станции.

Обе методики оценки длительности инфразвукового сигнала дают близкий результат. Об этом свидетельствует зависимость (1), где значение коэффициента при ΔT_{SFT} близко к 1, значение $R \approx 0.94$.

Зависимость периода основного колебания от энергии взрыва дается соотношениями (2), (3) и (4). Наибольшее значение $R \approx 0.90$ и наименьшее $\sigma \approx 0.19$ с имеет место при показателе степени около 0.44. В то же время теоретический закон подобия, а также эмпирический закон дают значение этого показателя, близкое к 0.33 [30]. При показателе 0.34 значение R лишь незначительно уменьшается (до 0.88), а σ увеличивается не более чем на 10 %. Зависимость (4) следует признать неудовлетворительной.

Зависимость длительности инфразвукового сигнала от энергии взрыва до настоящего времени, насколько известно авторам, не исследовалась. Нами получены линейные регрессионные зависимости (5) и (7) и степенные зависимости (6) и (8). Обе зависимости имеют близкие значения R и σ .

На относительно небольших (~ 200 км) расстояниях от места взрыва потери энергии инфразвуковой волны незначительны. Поэтому энергия инфразвуковой волны, пропорциональная энергии взрыва, должна быть пропорциональна произведению $\Delta p^2 \Delta T$. Как следует из соотношения (9), действительно показатель степени при E лишь незначительно отличается от единицы и составляет 1.07. При этом $R \approx 0.56$. Зависимость (10) не является приемлемой, так как $R \approx 0.25$.

Измерения амплитуды сигнала $\Delta p(t)$ при различных энерговыделениях E показали, что произведение $\Delta p^2 \Delta T_{WF}$ примерно пропорционально

E (см. регрессию (9)). Так и должно быть в силу закона сохранения энергии, поскольку потери энергии на трассах длиной около 200 км ещё незначительны. Регрессию (10) следует признать неудовлетворительной из-за заниженного значения показателя степени и низкого значения коэффициента достоверности.

Результаты настоящей работы и работы [19] в целом согласуются. В данных исследованиях скорость прихода инфразвуковых волн была несколько больше (300...330 м/с), чем в работе [19], где она составляла 300 ...310 м/с. К сожалению, измерения на одной станции не позволили оценить скорость атмосферного ветра так, как это было сделано в работе [19]. Полученные оценки скорости прихода представляются вполне разумными.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. При увеличении энерговыделения от 4.1 до 49.9 т ТНТ наблюдалась тенденция к увеличению амплитуды (примерно от 1 до 4 Па) и периода (примерно от 0.5 до 1.5 с) преобладающего колебания. Длительность цугов колебания при этом увеличивалась от 2.5 до 7 с.

2. При энерговыделении, равном 49.9 т ТНТ, в спектре колебаний преобладали гармоники с периодом от 1 до 2 с. Длительность цугов колебаний с такими периодами составляла 7 с.

3. Средняя скорость прихода волн изменялась в пределах 300...330 м/с.

4. Регрессионная зависимость периода инфразвуковой волны от энергии взрыва в целом близка как к теоретической, так и к эмпирической ($T \propto E^{0.34}$). При этом $R \approx 0.88$.

5. Регрессионная зависимость длительности инфразвукового сигнала от энергии взрыва близка к линейной. При этом $R \approx 0.64$ (для ΔT_{SFT}) либо $R \approx 0.68$ (для ΔT_{WF}). Приемлемыми также являются и степенные регрессии.

6. Регрессионная зависимость $\Delta p^2 \Delta T$ от энергии взрыва близка к линейной, что отражает закон сохранения энергии инфразвуковой волны. При этом $R \approx 0.59$.

Работа Черногора Л. Ф. и Шевелева Н. Б. финансировалась в рамках госбюджетной НИР учреждений МОН Украины, номер госрегистрации 0119U002538.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Дробжев В. И., Троицкая В. А., Федорович Г. В. Проект МАССА — исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях. *Физика Земли*. 1985. № 11. С. 5—8.
3. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. *Успехи физ. наук*. 1996. **166**. С. 1145—1170.
4. Ахмедов Р. Р., Куницын В. Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2004. **44**, № 1. С. 1—8.
5. Буш Г. А., Иванов Е. А., Куличков С. Н., Педанов М. В. Оценка параметров наземного импульсного источника дистанционным акустическим методом. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1989. **25**, № 11. С. 1164—1172.
6. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. *Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу*. М.: Наука, 2008. 295 с.
7. Девятериков И. А., Иванов Е. А., Козлов С. И., Кудрявцев В. П. О поведении заряженных частиц в нижней ионосфере при акустическом воздействии. *Космические исследования*. 1984. **22**, № 2. С. 238—242.
8. Дробжева Я. И., Краснов В. М. Пространственная структура поля акустических волн в атмосфере от «точечного взрыва». *Акустический журнал*. 2001. **47**, № 5. С. 641—649.
9. Китов И. О. *Сейсмические и акустические эффекты взрыва в геофизической среде*: дис... д-ра физ.-мат. наук. М.: Ин-т динамики геосфер РАН, 1995. 256 с.
10. Куличков С. Н. Дальнее распространение звука в атмосфере (Обзор). *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. **28**, № 4. С. 339—360.
11. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март — апрель 2003 г.). *Космічна наука і технологія*. 2003. **9**, № 2/3. С. 13—33.
12. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске. *Геофизический журнал*. 2004. **26**, № 4. С. 31—44.
13. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь. *Геофизический журнал*. 2004. **26**, № 6. С. 61—73.
14. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2006. № 6. С. 522—535.
15. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2008. **48**, № 5. С. 681—702.
16. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 4. С. 359—369.
17. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
18. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Магнито-ионосферные эффекты, сопровождавшие сильнейшую техногенную катастрофу. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2018. **58**, № 5. С. 700—712.
19. Черногор Л. Ф., Ляшук А. И., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми взрывами на арсенале боеприпасов. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. **23**, № 4. С. 280—293.
20. Черногор Л. Ф., Ляшук А. И., Шевелев Н. Б. *Системный спектральный анализ инфразвуковых сигналов, сгенерированных в течение техногенной катастрофы*. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Взаимодействие полей и излучения с веществом: Тр. XV конф. молодых ученых (16—21 сентября 2019 г., Иркутск, 2019). Иркутск, 2019. С. 178—180.
21. Черногор Л. Ф., Ляшук О. И., Шевелев М. Б. *Параметри інфразвукових сигналів в атмосфері, згенерованих протягом техногенної катастрофи поблизу м. Вінниця: результати обробки даних української мережі мікробарографів*. Зб. пр. V-ї наук.-техн. конф. Вип. 5. Обчислювальні методи і системи перетворення інформації (4—5 жовтня 2018 р., Львів). Львів: ФМІ НАНУ, 2018. С. 99—103.
22. Шевелев Н. Б., Ляшук А. И., Черногор Л. Ф. *Инфразвуковые сигналы, сгенерированные взрывами на военной базе вблизи города Винница*. 18 Українська конференція з космічних досліджень. Тези доп. Конф. (17—20 вересня 2018, Київ). Київ, 2018. С. 51.
23. Calais, E., Minster B. J., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophys. J. Inter.* 1998. **132**, № 1. P. 191—202.
24. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Rozumenko V. T., Shevelev M. B. *Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts (May 29—June 01, 2018, Kyiv). Kyiv, 2018. P. 87—88.

25. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. *Ultra-Wideband Infrasonic Signals Generated by Series of Chemical Explosions*. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals: Conf. Proceedings. 2018. P. 318–321.
26. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. *Ultra-Wideband Infrasonic Signals Generated by Series of Chemical Explosions*. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals: Conference Program and Book of Abstracts (September 4–7, 2018, Odessa). Odessa, 2018. P. 39.
27. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. *Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot*. Proceedings of the XIXth International Young Scientists' Conference on Applied Physics (May 21–25, 2019, Kyiv). Kyiv, 2019. P. 100–101.
28. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. *Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot*. Int. Conf. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts (May 28–May 31, 2019, Kyiv). Kyiv, 2019. P. 90–91.
29. Fitzgerald T. J. Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. **59**, № 7. P. 829–834.
30. Glasstone S., Dolan P. J. (Eds). *The effects of nuclear weapons*. US Department of Defense, US Department of Energy. 1977. 653 p.
31. Jacobson A. R., Carlos R. C., 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. **23**. P. 820–830.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2019

REFERENCES

1. Adushkin V. V., Spivak A. A., Soloviev S. P., Pernik L. M., Kishkina S. B. (2000). Geocological consequences of large chemical explosions in quarries. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*, № 6, 554–563 [in Russian].
2. Alperovich L. S., Gokhberg M. B., Drobzhnev V. I., Troitskaya V. A., Fedorovich G. V. (1985). Project MASSA – A study of magnetospheric-atmospheric relations in seismo-acoustic phenomena. *Izvestiya AN SSSR. Phys. Earth*, № 11, 5–8 [in Russian].
3. Astaf'eva N. M. (1996). Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Phys. Usp.*, **39**, 1085–1108.
4. Akhmedov R. R., Kunitsyn V. E. (2004). Simulation of the ionospheric disturbances caused by earthquakes and explosions. *Geomagnetism and Aeronomy*, **44**, № 1, 95–101.
5. Bush G. A., Ivanov Ye. A., Kulichkov S. N., Pedanov M. V. (1989). Estimation of the characteristics of a pulsed ground source by remote acoustic techniques. *Izvestiya, Atmos. and Oceanic Physics*, **25**, № 11, 861–866.
6. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. (2008). *Influence of earthquakes and explosions to ionosphere*. Moscow: Nauka.
7. Deviatnikov I. A., Ivanov E. A., Kozlov S. I., Kudriavtsev V. P. (1984). Behavior of charged particles in the lower ionosphere under acoustic excitation. *Kosmicheskie Issledovaniia*, **22**, № 2, 238–242 [In Russian].
8. Drobzheva Ya. V., Krasnov V. M. (2001). The spatial structure of the acoustic wave field generated in the atmosphere by a point explosion. *Acoustical Physics*, **47** (5), 556–564.
9. Kitov I. O. (1995). *Seismic and acoustic effects of explosions in the geophysical environment*. Doctoral (Phys.–Math.) Dissertation. Moscow: Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences [in Russian].
10. Kulichkov S. N. (1992). Long-range sound propagation in the atmosphere (Review). *Izv. Akad. Nauk, Fiz. Atmos. Okeana*. **28**, 3–20.
11. Chernogor L. F. (2003). Physical Processes in the Near-Earth Environment Associated with March–April 2003 Iraq War. *Space Science and Technology*, **9**, № 2/3, 13–33 [in Russian].
12. Chernogor L. F. (2004). Geophysical effects and geocological consequences of mass chemical explosions in military warehouses in the city of Artemovsk. *Geophys. J.*, № 4, 31–44 [in Russian].
13. Chernogor L. F. (2004). Geophysical effects and environmental consequences of fire and explosions at a military base near the city of Melitopol. *Geophys. J.*, **26**, № 6, 61–73 [in Russian].
14. Chernogor L. F. (2006). Ecological consequences of mass chemical explosions in anthropogenic catastrophe. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*, № 6, 522–535 [in Russian].
15. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagn. Aeron.*, **48**, № 5, 652–673.
16. Chernogor L. F. (2008). Geocological consequences of the explosion of an ammunition depot. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*, № 4, 359–369 [in Russian].
17. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
18. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2018). Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagnetism and Aeronomy*, **58**, № 5, 700–712.

19. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2018). Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot. *Radio Phys. Radio Astron.* **23**, № 4, 280—293 [In Russian].
21. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2018). *The infrasound signals parameters in atmosphere that generated during man-made catastrophe near Vinnytsia city: microbarographs Ukrainian network data analysis results*. Vol. 5. Evaluation methods and information convert systems: V science and technical conference Proceedings.
20. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2019). The System Spectral Analysis of Infrasonic Signals generating during man-made catastrophe. *Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics "Physical Processes in Outer and Near-Earth Space". XVI Young Scientists' Conference "Interaction of fields and radiation with matter"*.
22. Shevelev M. B., Liashchuk O. I., Chernogor L. F. (2018). *Infrasound signals that generated on explosions at military base near Vinnytsia city*. 18th Ukrainian Conference on space research.
23. Calais E., Minster B. J., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. (1998). Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophys. J. Inter.*, **132**, № 1, 191—202.
24. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Rozumenko V. T., Shevelev M. B. (2018). *Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University: Book of Abstracts.
25. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2018). *Ultra-Wideband Infrasonic Signals Generated by Series of Chemical Explosions*. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals: Conference Proceedings.
26. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2018). *Ultra-Wideband Infrasonic Signals Generated by Series of Chemical Explosions*. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals: Conference Program and Book of Abstracts.
27. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2019). *Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot*. Proceedings of the XIXth International Young Scientists' Conference on Applied Physics.
28. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2019). *Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference.
29. Fitzgerald T. J. (1997). Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **59**, № 7, 829—834.
30. Glasstone S., Dolan P. J. (Eds.). (1977). *The effects of nuclear weapons*. US Department of Defense, US Department of Energy.
31. Jacobson A. R., Carlos R. C., 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.* **23**, 820—830.

Received 16.08.2019

Л. Ф. Черногор¹

д-р фіз.-мат. наук, проф.

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

О. І. Лящук²

заступ. нач. Голов. центру спец. контролю, канд. фіз.-мат. наук, старш. дослідник

М. Б. Шевелев¹

аспірант, молод. наук. співроб.

¹ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

² Головний центр спеціального контролю НЦУВКЗ ДКА України

вул. Космічна 1, Радомишльський р-н, Житомирська обл., Україна, 12265

ЧАСОВИЙ І СИСТЕМНИЙ СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗИ ІНФРАЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ У АТМОСФЕРІ, ЗГЕНЕРОВАНИХ ВПРОДОВЖ ТЕХНОГЕННОЇ КАТАСТРОФИ

Метою роботи є викладення результатів спостереження хвилевих форм і системного спектрального аналізу інфразвукових сигналів, що супроводжували масові вибухи впродовж найсильнішої техногенної катастрофи неподалік м. Ічня, Чернігівська обл., Україна, 9—10 жовтня 2018 р. На військових складах знаходилося близько 69.5 тис. тонн боеприпасів. Площа арсеналу — 682 га. Його географічні координати: 50°51'45" пн. ш., 32°23'39" сх. д. Для спостереження використовувалися інфразвукові та сейсмічні станції Головного центру спеціального контролю. Інфразвукова станція Малин обладнана мікробарографом, що функціонує в діапазоні частот 0.3...10 Гц. Методика обробки цих спостережень в цих дослідженнях зводилася до наступного. Спочатку результати вимірів часових залежностей тиску

в інфразвуковій хвилі переводилися з відносних одиниць в абсолютні. Далі ці залежності піддавалися фільтрації в діапазоні періодів 0.2...5 с. Потім здійснювався системний спектральний аналіз відфільтрованих залежностей тиску в інфразвуковій хвилі за допомогою взаємодоповнюючих віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є і вейвлет-перетворення з використанням базисної функції Морле. Вивчено особливості хвильових форм інфразвукових сигналів, їхніх амплітуд і спектрального складу при далекому (218 км) поширенні хвиль, згенерованих впродовж техногенної катастрофи на арсеналі боеприпасів. Показано, що при збільшенні енерговиділення від 4.1 до 49.9 тонн ТНТ спостерігалася тенденція до збільшення амплітуди та періоду переважаючого коливання. Тривалість цугів коливання при цьому збільшувалася від 2.5 до 7 с. Виявлено, що при енерговиділенні, рівному 49.9 тон ТНТ, в спектрі коливань переважали гармоніки з періодами від 1 до 2 с. Розраховано, що середня швидкість приходу хвиль змінювалася в межах 300...333 м/с. Побудовано основні кореляційні поля.

Ключові слова: техногенна катастрофа, інфразвуковий сигнал, основні параметри сигналу, часові форми, системний спектральний аналіз, кореляційне поле, регресія.

*L. F. Chernogor*¹

Dr. Sci. in Phys.&Math., Professor

*O. I. Liashchuk*²

Deputy-Head of Main Center of the Special Monitoring,

Cand. Sci. in Phys. & Math., Senior Researcher

*M. B. Shevelev*¹

Post-Graduate Student, Junior Researcher

¹ V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

² Main Center of the Special Monitoring

National Space Facilities Control And Test Center, State Space Agency of Ukraine

1 Kosmichna Str., urban village Gorodok, Zhytomyr region, 12265, Ukraine

TEMPORAL AND SYSTEM SPECTRAL ANALYSIS OF INFRASONIC SIGNALS IN THE ATMOSPHERE GENERATED DURING A MAN-MADE CATASTROPHE

The work objectives are to present the results of observations of waveforms and the system analysis of the infrasonic signals accompanying the multiple explosions that occurred during a great man-made catastrophe near the Town of Ichnia (Ukraine) on October 9—10, 2018. The depot (50°51'45" N, 32°23'39" E) occupying a 1.685-acre surface area contained 69,500 tons of ammunition. The observations were conducted using infrasound and earthquake monitoring equipment of the Main Center of the Special Monitoring of NCCTOSM, SSAU. The Malyn infrasound station is equipped with the microbarograph recording fluctuations in the 0.3—10 Hz range of frequencies. The technique of data processing in the present study was as follows. First, the temporal dependences of relative pressure in the infrasonic wave were converted into units of pressure. Further, these dependences were filtered by band-pass filtering in the 0.2 – 5 s period range. Then, the system spectral analysis of filtered dependences was applied using mutually complementary 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 transformation employing the Morlet wavelet as a basic function. The features of the waveforms, amplitudes, and spectral content of the infrasonic signals generated during the man-made catastrophe and propagated over long distances (218 km) from the ammunition depot near the Town of Ichnia (Chernihiv Province, Ukraine) on October 9—10, 2018 have been investigated. It was shown that an upward trend in the amplitude and the period of the predominant oscillation were observed when the energy release increased from 4.1 to 49.9 tons of TNT. The duration of the oscillation trains increased from 2.5 to 7 s. The analysis revealed that the harmonics in the 1—2 s period range were predominant when the energy release was equal to 49.9 tons of TNT. It was calculated that the average celerity of waves varied within 300—333 m/s. The main scatter diagrams are plotted.

Keywords: man-made catastrophe, infrasonic signal, signal main parameters, temporal forms, system spectral analysis, scatter diagram, regression.