

Дослідження полтавських сейсмоприпливних записів у період подій-вибухів у Балаклії та Калинівці

В. П. Шляховий¹, Р. В. Шиян¹, Р. В. Шляховий², 2019

¹Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна

²Головне управління ПФУ в Полтавській області, відділ обробки інформації, Полтава, Україна

Надійшла 26 лютого 2018 р.

Исследуются сейсмоприливные записи, полученные в Полтавской гравиметрической обсерватории Института геофизики НАН Украины (ПГО) до, во время и после событий в г. Балаклея (22—23 марта) и в г. Калиновка (26—27 сентября) в 2017 г. (взрывы на складах боеприпасов). Цифровые записи получены на компенсационных сейсмонаклономерах и вертикальном сейсмометре (горизонтальная и вертикальная компоненты), термобарографе и модернизированном гравиметре GS-11. Анализ данных выполнен фильтрационным, спектральным, корреляционным и другими методами, результаты представлены в виде графиков. Изучение сейсмодиформационных эффектов при взрывах на военных складах является важной геофизической проблемой, решение которой позволяет параметризовать такие опасные события. Несмотря на важное социальное значение, разработана указанная проблема недостаточно, и требуются дополнительные исследования. В соответствии с анализом поточно-интервальных корреляционных функций и спектров, в записях до 23:00 UTC 22.03.17 и 19:00 UTC 26.09.17 (до начала взрывов) коэффициенты корреляции (K) по коротким тестовым корреляторам-отрезкам составляют менее 0,2, т. е. значимой корреляции по выбранным интервальным корреляторам не наблюдается. После указанного времени на записях существенно увеличивается число импульсно-волновых сейсмических пакетов, а в поточно-интервальных корреляционных функциях сеймопакеты становятся более четкими. Они также появляются в местах, где вследствие шумов их не видно на первичных записях. В некоторых случаях коэффициент корреляции между сеймопакетами возрастает ($K > 0,6 \div 0,8$). Это свидетельствует о сходстве импульсно-волновых пакетов и о том, что они генерируются в одном месте и имеют одно и то же физическое происхождение: очевидно — это взрывы. Выявлены характерные особенности сейсмодиформационных сигналов при указанных событиях. Отработана методика их анализа. Вместе с тем необходимо исследовать фундаментально-прикладные проблемы. Вследствие ограниченности ресурсов не изучены взаимодействие земная кора—атмосферный взрыв, энергетика зарядов и их влияние на спектры, остаточные скачки — деформации и др.

Ключевые слова: взрывы, Балаклея, Калиновка, сейсмонаклономер, корреляция, спектрограммы, энергия, сейсмические сигналы.

Вступ. Проблема вибухів і пожеж на військових складах, збудованих ще в СРСР, стає дедалі актуальнішою. Події-вибухи на цих складах часто відбуваються в країнах СНД. В Україні вони виникали вже неодноразово. Інколи ці надзвичайні ситуації (НС) дуже масштабні і мають тяжкі еко-

логічні, економічні та соціальні наслідки. До регіонально небезпечних НС належать вибухи в Артемівську (10.10.2003), Новобогданівці (Херсонська обл., 06.05.2004; 23.06.2005; 19.08.2006), Лозовій (Харківська обл., 17.08—11.09.2008), Сватовому (Луганська обл., 29.10.2015), Балаклії (Харківська обл.,

23—26.03.2017) і 26—27 вересня 2017 р. після 21:00 поблизу м. Калинівка (Вінницька обл.). Дивує, що останнім часом вибухи стаються у найбільших стратегічних складах. Деякі з цих подій призводили до людських жертв і майже всі — до масштабних евакуацій, сотні побудов зазнали ушкоджень, значні території потребували розмінування. Лише прямі витрати на ліквідацію наслідків однієї такої події сягають сотень мільйонів гривень, а сумарно — до 1 млрд грн. Загальні збитки через втрату матеріальних цінностей становлять мільярди доларів США (за даними Інтернету). Тому всебічне дослідження явищ і наслідків згаданих подій актуально, важливе та необхідне.

Детальні дослідження і комплексний аналіз вибухів у м. Артемівськ (жовтень 2003, Донецька обл.) та у Новобогданівці (травень 2004) виконав Л. Ф. Черногор. На підставі евристичних даних він оцінив енергетику подій і параметризував деякі геофізичні явища, що генерувалися при цих вибухах [Черногор, 2004а, б]. Крім того, Л. Ф. Черногор показав, що під час зазначених подій в атмосфері й геосередовищі виникало багато різних геофізичних явищ: надзвичайні світлові та термічні ефекти, пожежі, потужні ударні та акустичні хвилі, аномальні електричні та магнітні імпульси, масштабні забруднення атмосфери та земної поверхні тощо. Автор установив, що геоекологічні наслідки вказаних подій досить значні, а в разі збігу несприятливих обставин могли статися катастрофи субрегіонального масштабу. Втім зазначимо, що через відсутність надійних інструментальних даних аналіз деяких геофізичних явищ, що виникають при вибухових НС на військових складах, виконано побіжно. Наприклад, це стосується сейсмічних явищ і сейсмосигналів, що генерувалися під час указаних подій-вибухів.

Відомо, що значна частина вибухової енергії перетворюється в сейсмічні хвилі: приблизно до 10 % при наземних і 40 % при підземних вибухах. Такі хвилі реєструються геофізичними приладами, що можна і необхідно використовувати як цін-

ну інформацію про масштаби, характер і фізичні процеси при цих подіях. За достатньої якості такі дані можна використовувати для встановлення обставин розвитку і перебігу подій-вибухів. Тому аналіз їх записів, виявлення та ідентифікація сейсмічних сигналів, виявлення причин їх походження є актуальним завданням, що має важливе наукове і практичне значення. Найввістію у ПГО сейсмоприпливних записів точними і широкодіапазонними приладами забезпечено виконання цих досліджень.

Об'єкти досліджень. З 2005 р. у Полтавському регіоні при ПГО функціонує стаціонарний комп'ютерно-цифровий геодинамічний комплекс [Шляховий, 2007]. За його допомогою отримують цифрові записи на компенсаційних сейсмонахиломірах і вертикальному сейсмометрі (горизонтальні NS- і EW- та вертикальна Z-компоненти), термобарографах (розробки ПГО) і модернізованому гравіметрі GS-11. Записи отримано 24-бітними АЦП з частотою дискретизації 20, 40, 0,5 та 10 Гц відповідно. Основне завдання — дослідження і моніторинг геодформаційних процесів у регіоні. На жаль, через фінансові проблеми в останні роки в роботі інколи виникають перебої і тоді деякі компоненти не записуються. І все ж, у Полтаві в період подій-вибухів у Балаклії та Калинівці отримано записи, що дали змогу виконати дослідження і отримати важливі науково-практичні геофізичні результати. Дані автокомпенсаційних сейсмонахиломірів і вертикального компенсаційного сейсмометра (дискретизація 20 і 40 Гц) виявилися найінформативнішими. Дані інших геофізичних приладів використано як допоміжні для контролю стабільності умов і завад у пунктах спостережень.

Вибухи в Балаклії розпочалися 23 березня орієнтовно після 2 год ночі (за UTC — після 23:00 22.03.2017), а в Калинівці — 26 вересня після 21:00 (за UTC після 18:00 26.09.17). На диво, точнішої інформації про час виникнення цих НС немає, а обставини і причини їх виникнення дуже неоднозначні. Основним джерелом про

НС є ресурси Інтернету, де інколи з'являються інформація та фото про хроніку вибухових подій. Згідно з цією загальною інформацією в Балаклії потужних вибухів з великими світловими явищами було до 10, а середня частота подій в першу добу сягала 100 вибухів за хвилину і через добу зменшилась до двох за годину. В Калинівці було 2—3 потужні вибухи, а частота в перші кілька годин становила 50—60 подій за хвилину (за Інтернетом) і через добу зменшилася до 1—2 за годину. В Балаклії вибухи тривали 5 діб, а в Калинівці — 2 доби. Деякі вибухи були досить потужни-

ми, тому вони генерували інтенсивні сейсмічні коливання. Ці сигнали добре сприймалися геофізичними приладами навіть на далеких відстанях. Отже, отримано цінну інформацію про характер перебігу подій, їх енергетику та геофізичні умови на трасі.

Опис матеріалів і регіонів досліджень. При детальному вивченні сейсмічних сигналів від подій-вибухів було використано сейсмонахиломірні записи за 21—25 березня (події в Балаклії) та 25—29 вересня 2017 р. (події в Калинівці). На рис. 1, 2 бачимо, що в записах часто реєструються сейсмічні хвильові пакети. Очевидно,

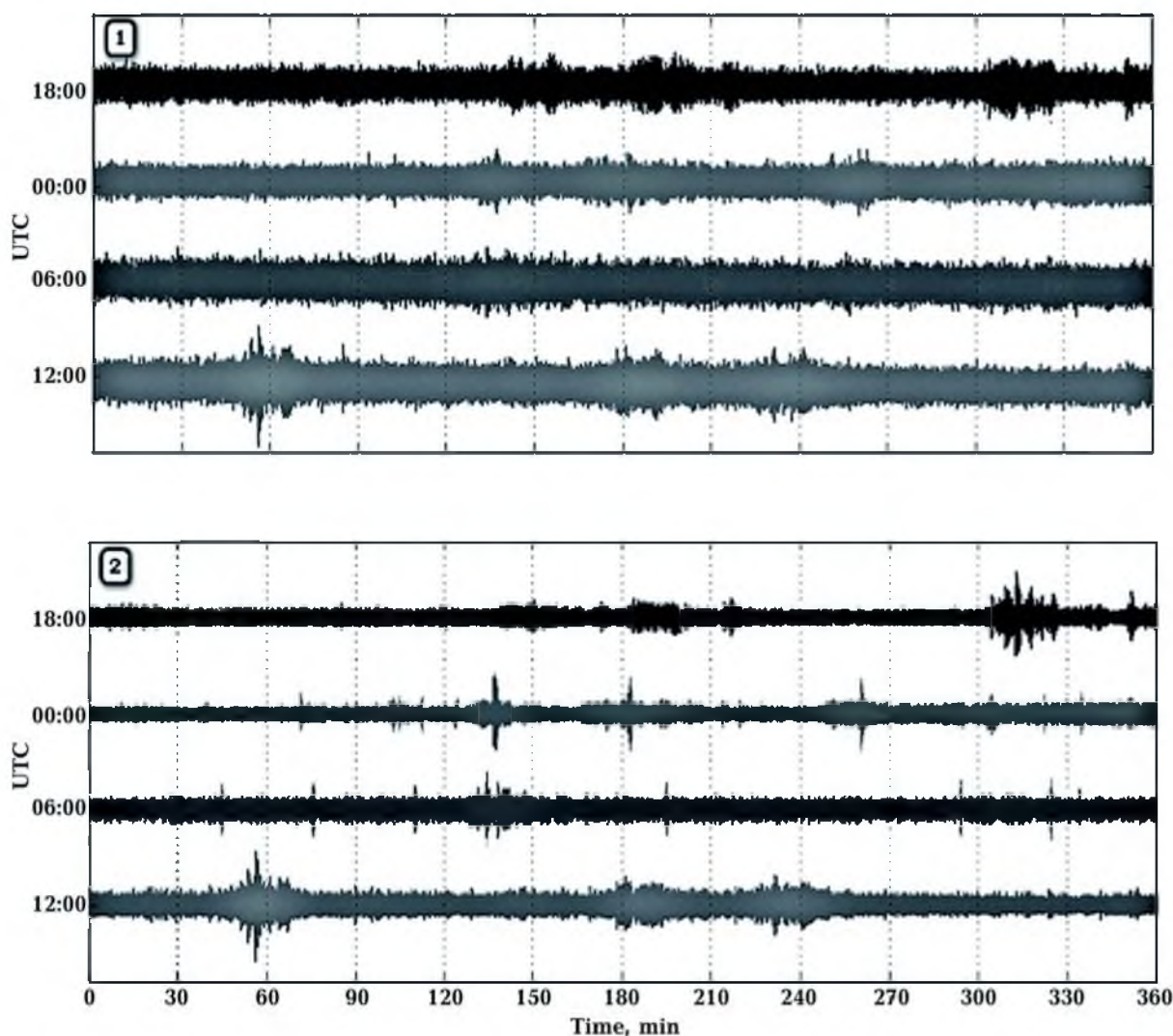


Рис. 1. 24-годинна графічна реалізація цифрового сейсмонахиломірного запису з 18:00 22.03.17 по 18:00 23.03.17 (UTC) під час вибухів у Балаклії: 1 — чотири 6-годинні інтервали нефільтрованих цифрових записів; 2 — ті самі записи після цифрової смугової фільтрації (1—3 Гц). Масштаби: по вертикалі — сейсмічні сигнали, мВ; по горизонталі — час, хв.

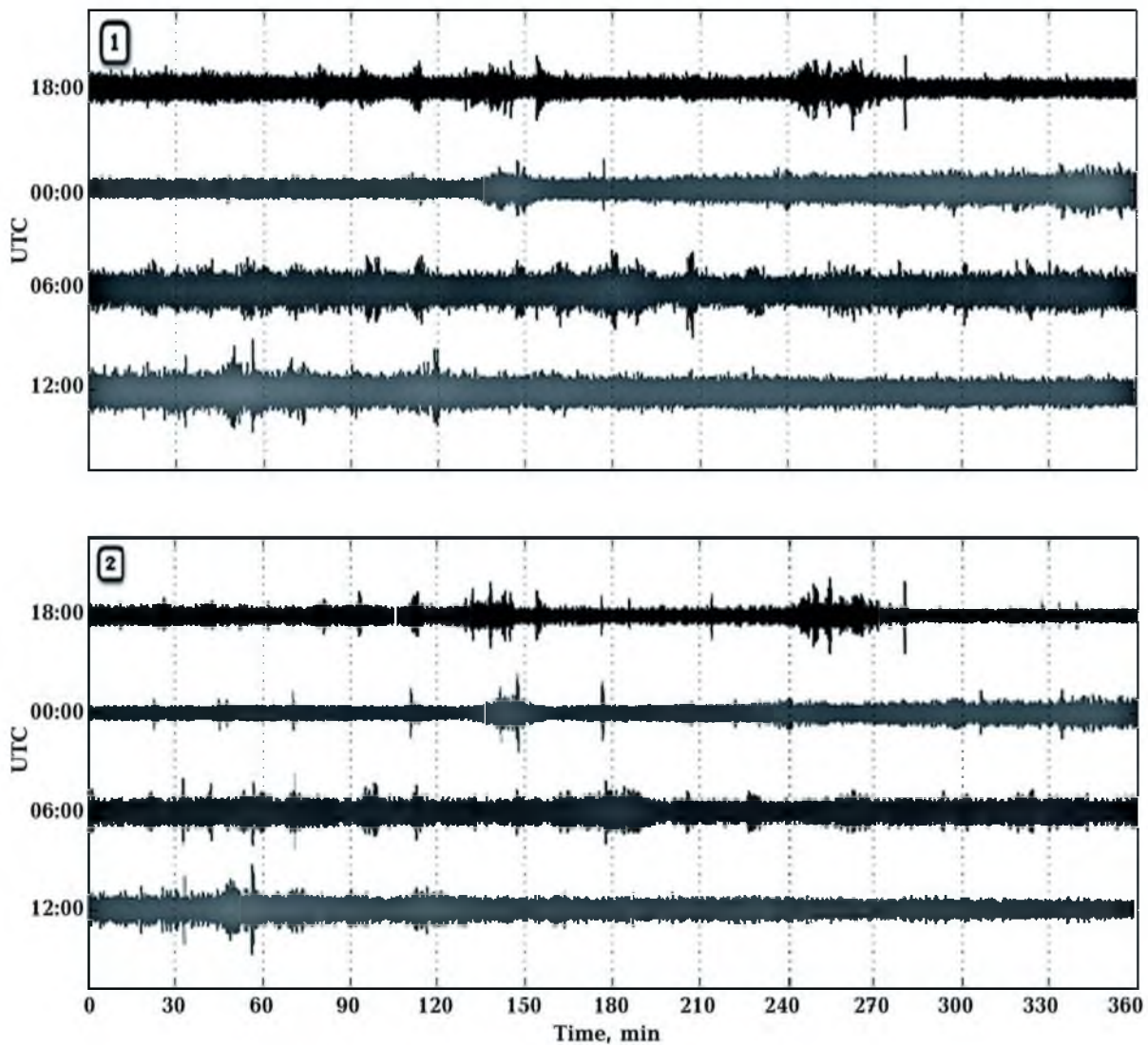


Рис. 2. 24-годинна графічна реалізація сейсмонахиломірного запису з 18:00 26.09.17 по 18:00 27.09.17 (UTC) під час вибухів у Калинівці. Деталізація графіків і параметрів така сама, як і на рис. 1.

деякі з них є сигналами від близьких чи віддалених землетрусів, а інші спричинені місцевими чи регіональними техногенними чинниками, в тому числі вказаними подіями-вибухами. Кількість і потужність таких сигналів протягом перших кількох годин після початку вибухів були великими і поступово зменшувалися, наприкінці першої — у другій добі сигнали вибухового характеру вже не виділялися на фоні сейсмічних шумів.

Звичайно, кожен вибух генерує відповідні сейсмічні хвилі, але їх форма має бути подібною, тому що поверхневі вибухи

стаються в одному і тому самому пункті та в подібних умовах (за винятком потужності). Малопотужні вибухи теж генерують сейсмічні сигнали, але їх маскує сейсмічний шум, і вони проявляються слабо. Очевидно, потрібно виявляти, ідентифікувати та параметризувати сейсмічні сигнали-імпульси, спотворені шумами. Для цього було створено спеціальну методичку аналізу таких сигналів з урахуванням характеру сигналів. Вона виявилася досить ефективною, навіть за співвідношення С/Ш менше 0,2—0,3.

Траси проходження сейсмічних сигнала

лів із Балаклії чи Калинівки в Полтаву різняться за складом порід і структурою геотектоніки (рис. 3).

Сейсмічні траси між пунктом реєстрації (Полтава) та центрами подій одна від одної відрізняються за відстанню: до Балаклії — 167 км в азимуті 97° , а до Калинівки — 436 км в азимуті 267° , тобто майже точно на схід і на захід. Траси різні за пружнодемпфрувальними параметрами порід геосередовища і за геотектонікою. Це впливає на інтенсивність і спектр сейсмічних хвиль. Будова територій, по яких проходять сейсмічні траси, і характер сеймосигналів від цих НС стають зрозумілішими після вивчення профілів ГСЗ [Сологуб, 1986; Старостенко, 2012]. Для нас інформативними є дані щодо поздовжніх (ХІІ, ХХV, ХХХ) та поперечних (ІІ, ІV, VI, ХVІ, ХХІІІ, ХХІV, ХХХІV) геотраверсів. Опишемо деякі особливості досліджених сейсотрас.

Місто Балаклія (32 тис. жителів, Харківська обл., координати: $\varphi = 49,4726^\circ$; $\lambda = 36,8686^\circ$), як і м. Полтава ($\varphi = 49,6034^\circ$; $\lambda = 34,5424^\circ$), розташоване в центральній частині Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), верхню частину земної кори якої складає потужна товща осадових порід: від 12—13 км у районі Полтави до 16—17 км у районі Балаклії. Осадовий шар структурований за глибиною: до 1 км — швидкість $V_p < 4$ км/с, а на глибинах 1—7 км — $V_p = 4,5$ —5,0 км/с, на глибині 8—12 км — $V_p = 4,5$ км/с, тобто зменшується, а нижче швидко зростає від 5,5 км/с на глибині 13 км до 6,1 км/с на глибині 17 км [Гордиенко и др., 2006]. Очевидно, що сейсмічні сигнали на шляху з Балаклії до Полтави проходять переважно через ці шари. Час вступу сигналів у ПГО може становити від 27 до 42 с і більше в разі неодноразових відбивань між шарами. Сейсмічні хвилі на цій трасі розсіюються і поглинаються в соля-

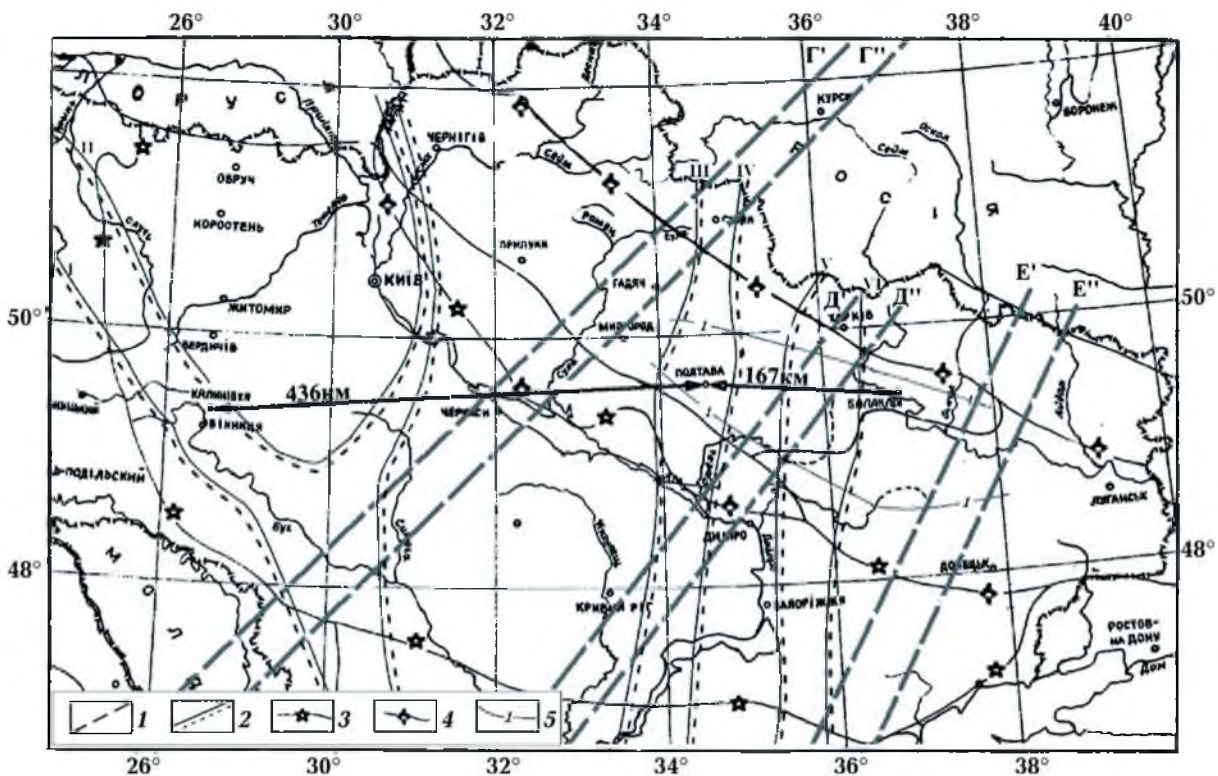


Рис. 3. Карта території досліджень з елементами блокової геотектоніки України і трасами сейсмічних сигналів: 1 — мантійні розломи (Γ' — Γ'' , D' — D'' і E' — E''); 2 — глибинні розломи; 3 — межа Українського щита; 4 — межа Дніпровсько-Донецької западини; 5 — міжблокові розломи [Сологуб, 1986].

них штоках (Новодмитрівському, Старовірівському, Чутівському та ін.) і на кількох глибинних тектонічних розломах, що перетинають ДДЗ [Ганженко, Зейкан, 2011].

Місто Калинівка (19 тис. жителів, Вінницька обл., $\varphi = 49,4079^\circ$; $\lambda = 28,4922^\circ$) розташоване на заході Українського щита (УЩ). Земна кора щита складається з тонкого шару осадових порід (0—0,2 км) і двох потужних шарів кристалічних порід завтовшки 35—45 км. У верхньому шарі (до 15 км) швидкість поширення сейсмічних хвиль $V_p = 6,28$, а в нижньому (15—40 км) $V_p = 6,78$ км/с [Шумлянская и др., 2014]. Отже, час вступу хвиль з Калинівки в Полтаву дорівнює 64—70 с. Якщо виходити тільки з геометрії, то сейсмічні хвилі від вибухів у Калинівці через відстань ослаблюються на порядок. Також вони згаса-

ють і спотворюються міжблоковими розломами північно-східної орієнтації та при перетині південно-західного борту ДДЗ. Однак траса пролягає у кристалічних породах УЩ з малим поглинанням і лише 20 км — в осадових породах ДДЗ з більшим поглинанням. Тому записи сейсмічних хвиль від вибухів у Полтаві тільки в кілька разів гірші, ніж записи із Балаклії.

Ретроспективні дослідження сейсмоприпливних записів. Уже на первинних записах часто виявляються сейсмічні імпульсно-хвильові пакети. Детальні дослідження виконано по 4-добових записах до подій та під час подій у Балаклії і в Калинівці. Частина виявлених сейсмічних сигналів є каталожними землетрусами (табл. 1, 2). За їх допомогою виконано ідентифікацію сеймосигналів. До вибухів у Балак-

Т а б л и ц я 1. Список землетрусів (субрегіональних з $M > 2,0$ і субконтинентальних з $M > 4,5$), які могли бути записані в Полтаві під час подій в Балаклії 22—23 березня 2017 р. в інтервалі часу, показаному на рис. 1

№ п/п	Год : хв.: с UTC	Широта, град	Довгота, град	Гли- бина, км	Маг- нітуда	Відстань, км	Наяв- ність	Регіон
22.03								
1	17:11:18	45,72	26,56	90	2,8	780	–	Румунія
2	18:57:16	38,52	72,60	100	4,3	3250	–	Таджикистан
3	19:53:27	36,81	54,34	10	4,1	2160	–	Іран
23.03								
4	00:08:27	40,61	15,70	21	3,1	1780	–	Італія
5	00:26:53	41,63	26,56	1,0	2,9	750	–	Грузія
6	00:32:01	40,02	39,19	13	3,3	1130	–	Туреччина
7	00:34:05	39,94	39,14	11	3,1	1130	–	»
8	02:32:25	37,23	56,79	2	3,5	2250	–	Іран
9	02:43:42	34,67	26,47	8	3,0	1790	–	Крит
10	04:46:48	37,28	36,00	7	3,1	1370	–	Туреччина
11	12:23:45	36,63	71,30	239	4,4	3280	–	Афганістан
12	16:42:31	38,70	43,26	7	3,1	1400	–	Туреччина
13	17:02:19	34,84	24,05	18	3,0	1850	–	Крит

лії чи Калинівці протягом кількох діб сейсмоприпливні записи склалися з мікросейсм, шумів і рідких сейсмичних пакетів (див. рис. 1, 2).

Більша частина імпульсних сейсмоподій, виявлених удень, можуть бути проявами місцевих, полтавських, технологічних процесів (промислові вибухи в кар'єрах, забивання паль, рух потягів залізницею в 1,2 км від пункту реєстрації, інші спотворення індустріального походження у м. Полтава). Походження кількох сейсмичних сигналів установити не вдалося. Слід додати, що, згідно із законодавством, промислові вибухи виконують тільки в денний час, і тому в нічний час (18:00—05:00 год) рівень імпульсних шумів та мікросейсм значно менший, ніж удень. Після початку подій-вибухів у Балаклії число сейсмич-

них пакетів збільшилось, а амплітудні величини деяких записаних сигналів стали в 3—5 разів більшими за фон шумів. Це вибухи, але очевидно, що багато сейсмичних сигналів від малопотужних подій у первинних записах не виділяються на фоні шумів.

Після НЧ або смугової фільтрації шуми суттєво зменшуються, а сеймопакети стають чіткішими (див. рис. 1, 2). Співвідношення С/Ш зростає і збільшується кількість виявлених імпульсних пакетів. Це засвідчує помітний вплив шумів АЦП. Слід урахувати, що на виході приладів перед АЦП стоять аналогові "елайзинг" НЧ-фільтри. Це гасить шуми з частотою більш як 10 Гц, але також зменшує ВЧ-компоненти реального сейсмичного сигналу. При цьому рівень ВЧ-шуму АЦП залишається, тоб-

Т а б л и ц я 2. Список землетрусів (субрегіональних з $M > 2,0$ і субконтинентальних з $M > 4,5$), які могли бути записані в Полтаві під час подій в Калинівці 26—27 вересня 2017 р. в інтервалі часу, показаному на рис. 2

№ п/п	Год : хв.: с UTC	Широта, град	Довгота, град	Глибина, км	Магнітуда	Відстань, км	Наявність	Регіон
26.09								
1	18:02:53	34,44	25,62	9	3,4	1840	–	Кріт
2	19:08:17	1,28	132,82	10	5,3	10 500	+	Індонезія
3	20:22:13	40,31	142,37	52	5,9	7800	+	Японія
4	20:32:11	40,90	48,62	8	3,0	1460	±	Кавказ
5	21:29:05	– 23,71	– 179,9	543	5,4	15 900	–	Фіджі
27.09								
6	04:09:52	28,72	– 43,63	10	5,0	6800	–	Атлантика
7	04:13:02	– 3,62	139,87	69	5,3	11 400	–	Індонезія
8	08:28:06	28,01	54,18	30	4,6	2920	±	Іран
9	09:15:25	45,44	26,30	120	3,3	774	–	Румунія
10	10:04:03	43,91	16,54	2	3,0	1500	–	Балкани
11	11:06:09	41,84	2,68	5	3,0	2600	–	Іспанія
12	11:31:03	51,55	16,10	1	3,5	1320	–	Польща
13	15:36:06	34,5	25,64	18	3,4	1830	–	Кріт
14	17:25:16	40,65	21,71	1	3,4	1410	–	Греція

то реальні сейсмічні події можуть маскуватися ВЧ-шумами, які можуть бути мікросейсмами чи шумами АЦП. При цифровій НЧ-фільтрації шум АЦП зменшується, але також зменшується високочастотний корисний сигнал. Коли спектр шумів АЦП лежить у ВЧ-діапазоні, а спектр сигналу не має високих частот, то НЧ або смугова фільтрація є ефективними засобами виділення корисних сигналів. Отже, для надійної реєстрації сейсмічних хвиль і селекції подій-вибухів слід збільшити частоту дискретизації і зменшити шуми АЦП.

У сейсмоприпливних записах під час подій у Калинівці ситуація аналогічна (див. рис. 2). Проте в цей період було більше помітних землетрусів на субрегіональних з $M > 2,0$ та субконтинентальних відстанях з $M > 4,5$ (табл. 2). Обидві НС відбувались у робочі дні тижня. Тому вдень рівень техногенних шумів досить високий і аналіз денних сейсмозаписів при виділенні Калинівських подій складніший, а надійність їх виявлення менша, відповідно до рис. 2 у нічний час 26—27 вересня були досить інтенсивні сейсмічні сигнали ($C/Ш > 3$). За попередніми дослідженнями виявлено, що землетруси з $M < 3,0$ на відстані понад 500 км у Полтаві практично не реєструються, а спектр цих сигналів лежить у ВЧ-діапазоні, тому сейсмопакети можуть бути місцевими подіями.

Вивчення первинних чи НЧ-фільтрованих записів не дає змоги точно ідентифікувати сейсмічні хвилі від малопотужних вибухів, кількість яких значно більша. Із застосуванням смугової фільтрації з частотною адаптацією можна суттєво покращити селекцію імпульсних сейсмічних подій (див. рис. 1, 2). Однак для надійної ідентифікації подій-вибухів необхідно застосувати ефективніші методи аналізу, наприклад кореляційний, спектральний та ін.

Кореляційно-спектральний аналіз даних. Відомо, що кореляційні дослідження ефективні при виявленні подібності подій, особливо за великого рівня шумів. Така ситуація склалась і в наших спостереженнях, де вивчення кореляцій виявилось до-

сить ефективним. Для цього було створено комп'ютерну програму поточного аналізу цифрових даних інтервально-кореляційним методом. На масиві в кілька мільйонів ординат вона дає змогу визначати поточні коефіцієнти крос-кореляції за вибраним інтервалом кореляції та подавати результат у графічному вигляді. При цьому можна виявляти подібність подій (наприклад вибухів) на довгих реалізаціях.

Аналіз поточних крос-кореляційних функцій за різними тест-відрізками до початку вибухових подій за даними на 21—24 березня в Балаклії показав відсутність значущої крос-кореляції ($K < |0,25|$) (рис. 4). Тут і нижче кореляції розраховано у кожній точці запису, і якщо "корелятор" проходить сам по собі, то $K = 1$. Тоді отримуємо 100%-ву автокореляцію, цю точку не беремо до уваги при оцінюванні подібності.

Іншу поведінку мають кореляційні графіки одногодного запису за кореляторами, взятими в час існування імпульсних сейсмопакетів (рис. 5), де після графіка первинного запису послідовно показано 9 корелограм для кореляторів з початком у точках (вертикальні лінії на запису, на корелограмах в цих точках $K = 1$), коли на первинному записі виділяються імпульсні сейсмічні сигнали.

Вивчення графіків 2—4 на рис. 4 та 2—10 на рис. 5 показало, що за різнотипних подій маємо низьку кореляцію, навіть якщо в записах є імпульсні сейсмопакети. Якщо в деякі періоди поява цих пакетів пов'язана з однією причиною, то коефіцієнт кореляції між сейсмопакетами зростає ($K > 0,6—0,8$), що засвідчує їх подібність. На крос-корелограмах число сейсмопакетів значно більше, ніж у первинних чи фільтрованих записах. Пакети виявляються навіть там, де їх не видно внаслідок шумів, що вказує на виникнення малопотужних сейсмічних подій, очевидно, вибухів у Балаклії.

Подібною є картина під час подій-вибухів у Калинівці (рис. 6, 7). Однак у цих корелограмах немає великих коефіцієнтів крос-кореляції і такої рельєфності, як під час подій в Балаклії. На корелограмах ви-

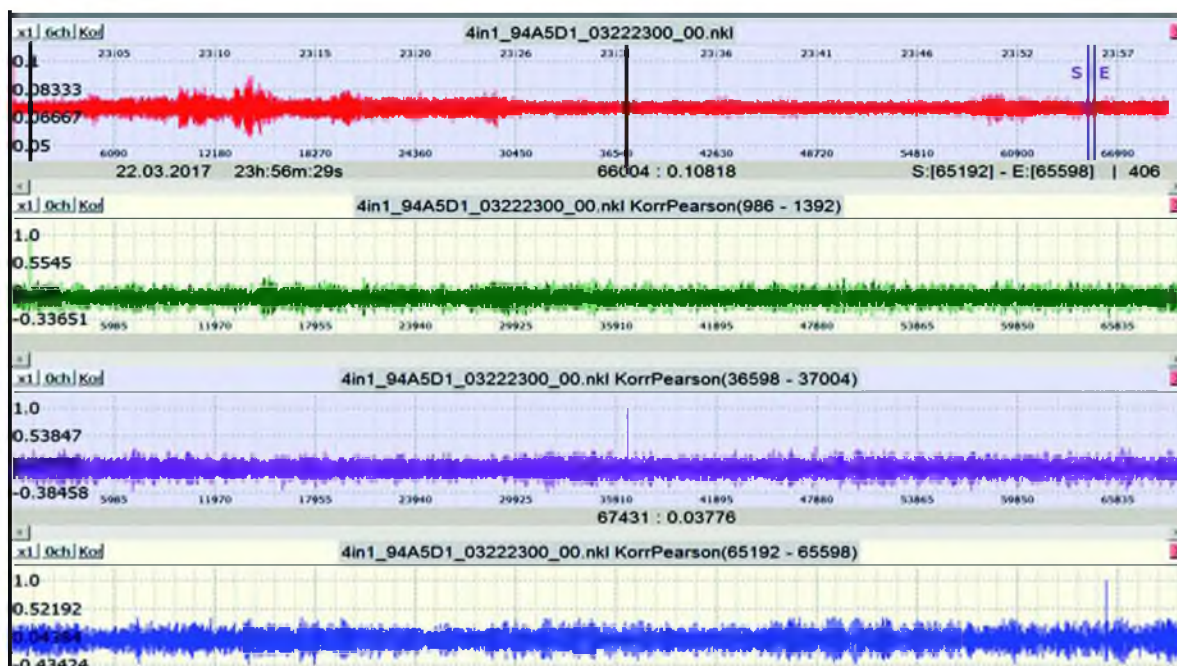


Рис. 4. Балаклія, 23:00 (UTC) 22 березня. Запис сейсміки до і після початку вибухів (вверху) та 3 корелограми (внизу) за відсутності сейсмопакетів (тут і надалі початок кожного тест-інтервалу, тобто "корелятора", позначено вертикальними лініями).

діляється мало випадків з $K = 0,5 + 0,6$ і дуже багато з $K = 0,35 + 0,45$. Пояснюємо це згасанням і поглинанням сейсмічних хвиль через велику відстань та наявність тектонічних розломів на трасі.

Згідно з аналізом графіків кореляцій (рис. 6, 7) фонове значення коефіцієнта кореляції $K < 0,25$. Інколи виділяються сплески з $K = 0,4 + 0,6$ і дуже часто з $K = 0,35 + 0,45$. Це вказує на велику кількість однотипних, подібних подій, імовірно невеликих вибухів.

Слід урахувати, що під час поверхневих вибухів сейсмогенерувальним фактором є "ударна хвиля", тиск, швидкість, форму і час існування якої визначають коренем кубічним від потужності (еквівалентної маси) вибухової речовини. Тому за невеликої різниці мас спектрально-часові параметри сейсмічних сигналів будуть подібними. Якщо вибухають заряди з великою різницею мас (на порядок і більше), то параметри сейсмічних сигналів різняться і кореляційні графіки мають різну форму.

Для ідентифікації та встановлення природи сейсмічних сигналів важливу інформацію отримують, досліджуючи поточно-інтервальні спектри. Вони показали, що за відсутності сейсмічних подій в спектрах записів виділяються коливання з частотами $0,15\text{—}0,3$ Гц (періоди 4—6 с). Це звичайні мікросейсми, на спектрограмах 22 березня з 00:00 до 23:00, тобто до вибухів, вони домінують за інтенсивністю, за винятком кількох інтервалів, де записані субрегіональні чи далекі землетруси, які слабо проявилися на записах. У спектрах цих землетрусів переважають сигнали з частотами менше 1 Гц, вони мають широку полосу та розтягнуті в часі з максимумами амплітуд на малих частотах.

Якщо в записах існують сигнали іншого походження (місцеві землетруси чи вибухи), то в спектрах крім мікросейсм виникають хвилі з частотами понад 1—2 Гц. При цьому спектри землетрусів теж розтягнуті в часі. Вибухи мають короткий термін існування з локалізацією максимумів інтенсивності на високих частотах (рис. 8).

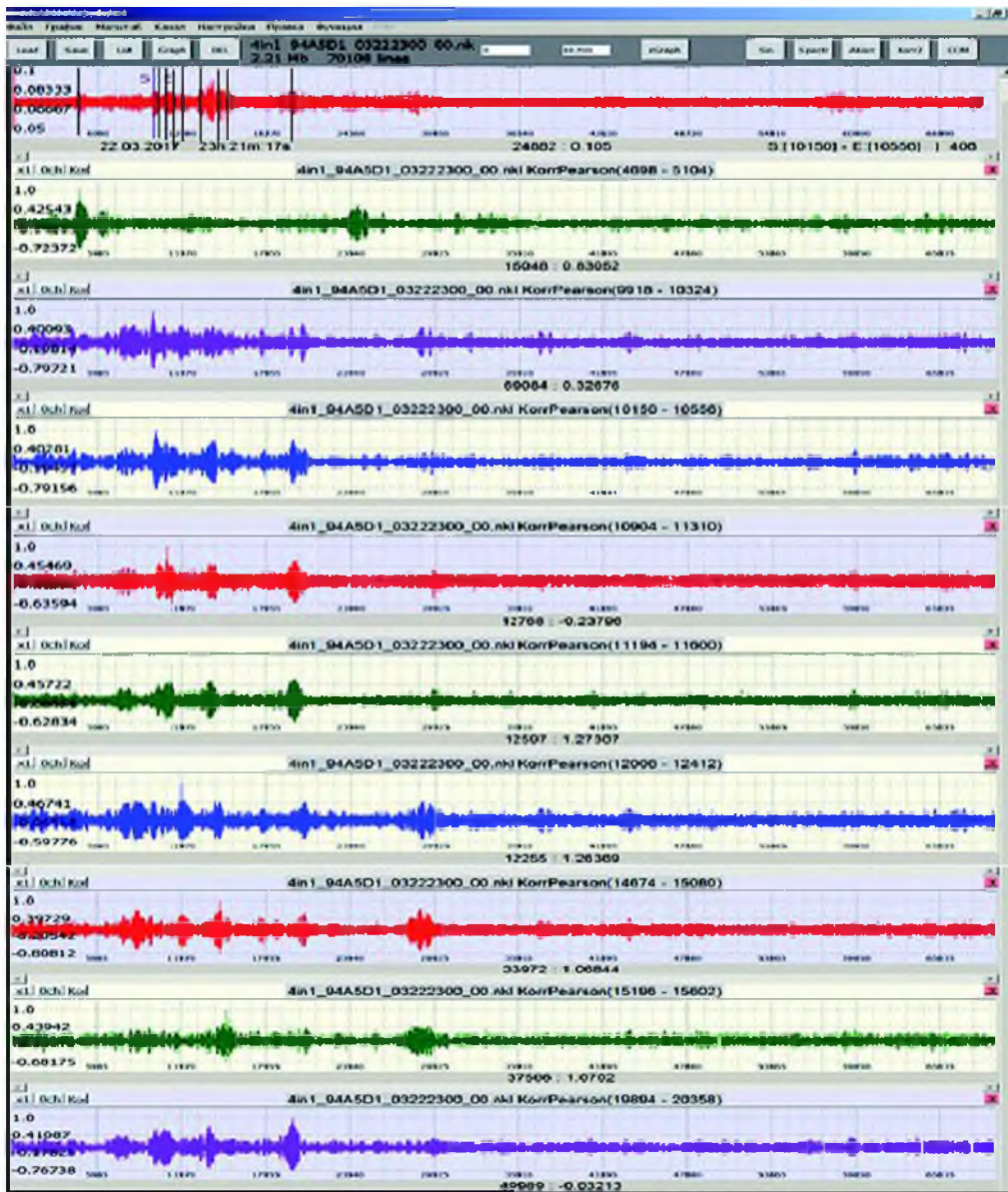


Рис. 5. Крос-кореляційні функції 23-ї години запису 22 березня (UTC) на початку подій-вибухів у Балаклії. Вверху — первинний запис, внизу — крос-кореляції, визначені за кореляторами, позначеними вертикальними лініями, із сеймопакетами.

На спектрограмах бачимо, що з 20:09 до 20:30 було записано короточасові високочастотні інтенсивні імпульсні сигнали. Це — вибухи. Спектрограми таких подій на записах і вертикального сейсмометра, і сеймонахиломірів, які розміщені в 150 м один від одного, дуже подібні. Їх основні спектральні компоненти концентруються у вузькій полосі (1,5—2,5 Гц). Характерно, що вони виділяються рельєф-

ніше на Z-компоненті. З 20:33 по 20:41 проявляється картина з характерними ознаками землетрусу: сейсмічний сигнал має широкий спектр з максимумом у діапазоні низьких частот (< 1 Гц). За даними табл. 2, це дійсно запис японського землетрусу, який стався 26.09.2017 р. у 20:22:13, $M = 5,9$. Його спектр змінюється в часі від 1,0—0,3 Гц на початку до 0,3—0,4 Гц і менше в кінці землетрусу.

Вивчення інших спектрограм показало, що подібна поведінка спектрів, тобто поступове зменшення частоти та широка полоса, типова для землетрусів: від ширшої частотної смуги на початку події до зменшення частоти і ширини смуги у хвостовій частині. Під час сейсмічних подій вибухового типу на спектрограмах виділяються "точкові" сигнали з чіткою прив'язкою за часом і частотою. Таким способом можна відрізнити землетрус і вибухову поверхневу подію. Це важливо і досить актуально, оскільки залишається проблемою надійна ідентифікація сейсмічних сигналів [Чжань, и др., 1986] природного і техногенного походження, але високої точності в автоматичному визначенні їх природи ще не досягнуто. Аналіз даних рис. 8 показав, що запропонована методика до-

сить ефективна. Так, за одночасного запису японського землетрусу і вибуху на спектрограмі ці події чітко розділяються: у верхній частині спектрограми в записах землетрусу на вертикальному сейсмометрі і на сейсмонахиломірі на високих частотах ясно виділяється сигнал — сплеск, подібний до трьох сигналів-вибухів, що вже виявлені перед землетрусом.

Дискусія і висновки. Експериментальні дослідження геофізичних явищ під час подій-вибухів боеприпасів на складах мають багатоплановий характер. Мета — створення геофізичної методології виявлення та параметризації таких НС, розробка систем їх моніторингу. Це, ймовірно, дасть змогу контролювати хід таких НС, вивчати явища та умови, які їх супроводжують чи передують їм. Вивчення сейсмоприплив-

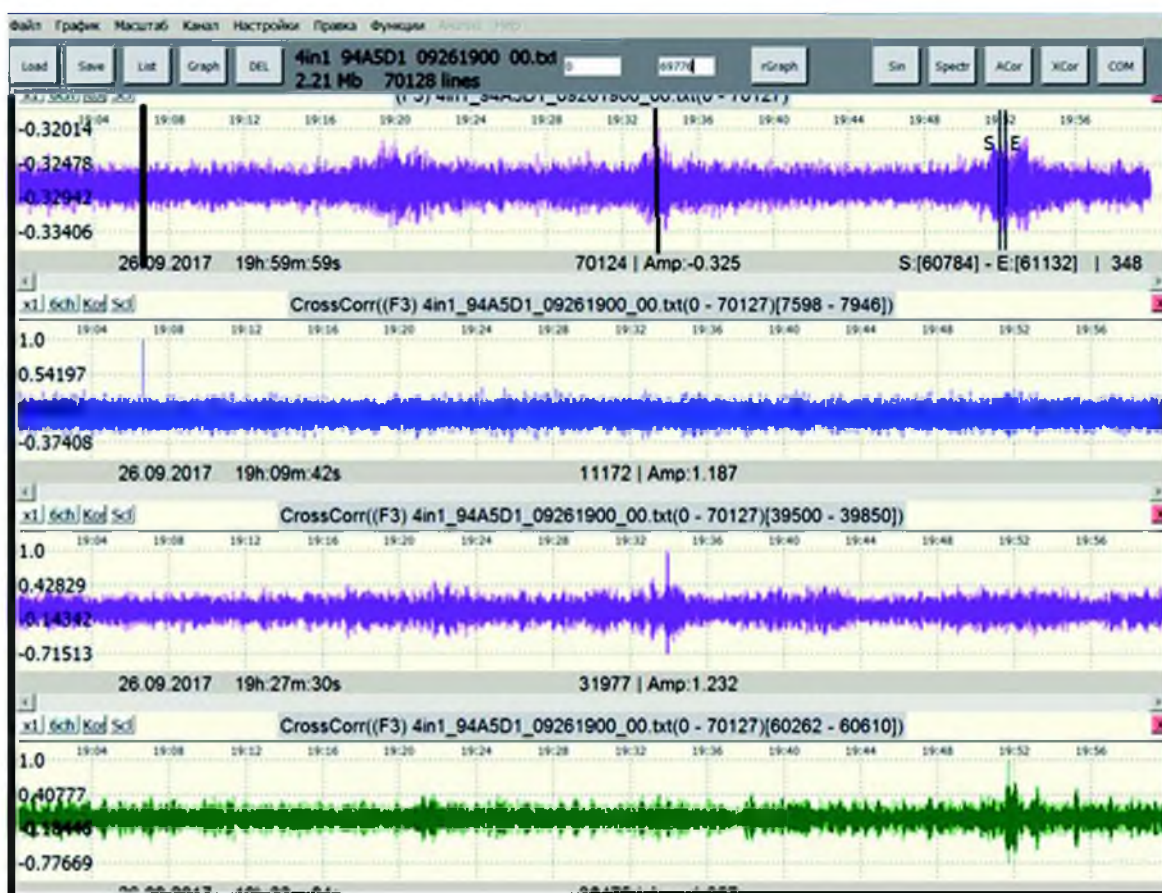


Рис. 6. Запис 1-ї години запису до і на початку вибухів (Калинівка, 26 вересня, 19:00 UTC, верхній графік) і корелограми (внизу) за відсутності імпульсних сейсмопакетів (тільки шум) і наявності двох слабких сейсмічних сигналів.

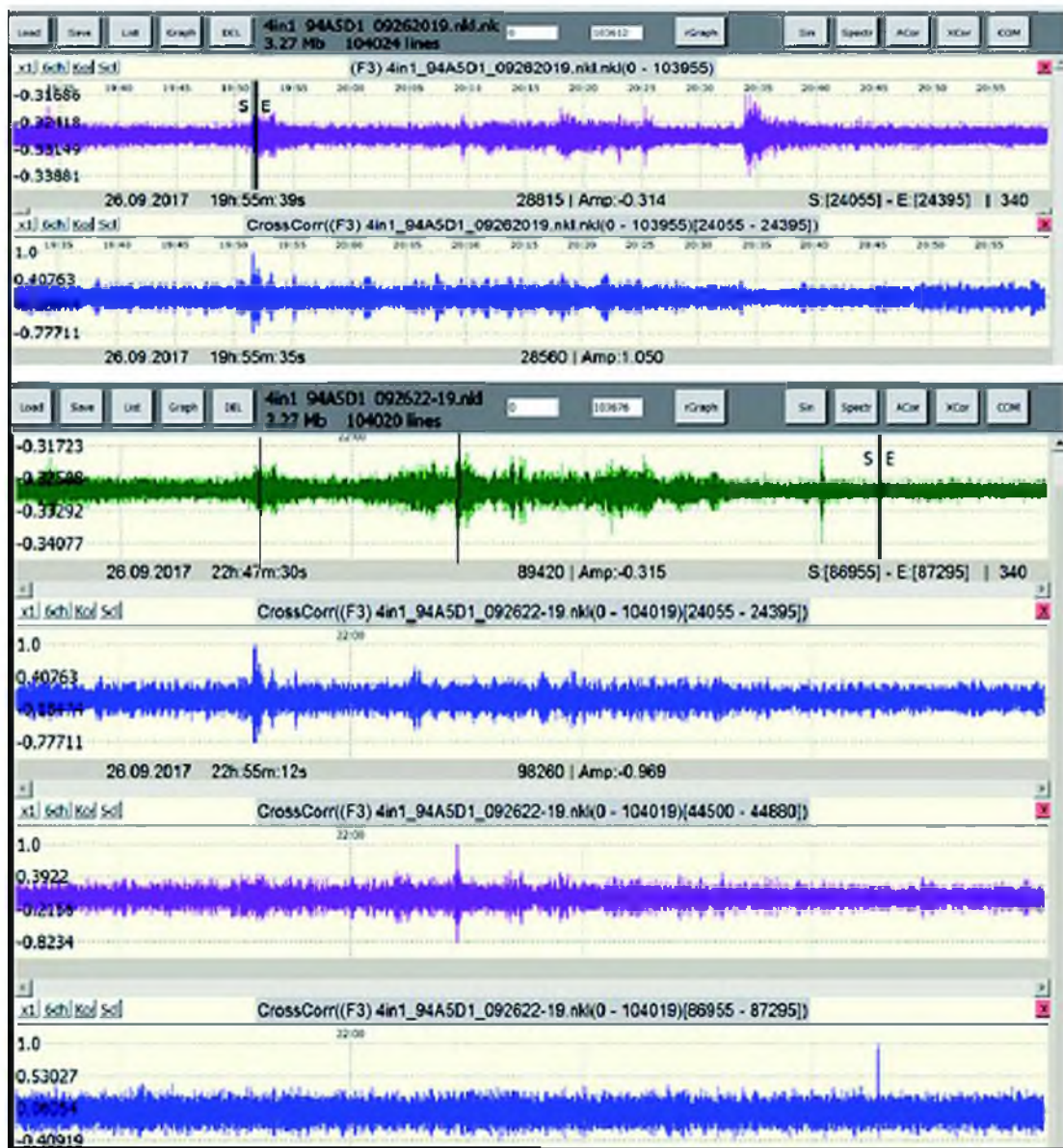


Рис. 7. Крос-кореляційні функції 20-ї та 22-ї годин запису 26 вересня (UTC) під час вибухів у Калинівці. Верхні два графіки — первинний запис і корелограма 20-ї години. Нижні чотири графіки — запис і корелограми для 22-ї години. Крос-кореляції визначено за кореляторами з сеймопакетами, початок яких позначено вертикальними лініями.

них записів до, у період та після вибухів на складах боєприпасів показало, що навіть за значної відстані на підставі результатів сейсмоприпливних досліджень можливо виявляти і параметризувати їх енергетику і статистику. Внаслідок особливого статусу вказаних об'єктів ще кілька десятиліть тому подібні дослідження були секретними, і відкритої інформації з цієї проблеми недостатньо. Тільки відкритість і об'єк-

тивність зазначених досліджень забезпечать надійність та безпеку розглянутих об'єктів в Україні.

Виконані дослідження стосуються переважно розробки методики аналізу даних геофізичних спостережень на предмет виділення вибухів. Проаналізовано лише деякі результати вивчення сеймодеформаційних явищ, що виникають під час таких подій. Звичайно слід врахову-

вати особливості фізико-механічних процесів, що виникають за поверхневих вибухів. Для цього потрібно використовувати результати досліджень аналогічних задач, що виникають під час промислових чи геолого-розвідувальних вибухів [Горбунова и др., 2011; Кутас и др., 2014]. Ця складна проблема пов'язана з розв'язанням пружнопластичних задач.

У статті описано деякі особливості розвитку сейсмодеформаційних процесів під час подій-вибухів на складах боєприпасів. Отримано цікаві та важливі результати. Розглянуто сейсмоприпливні технології, важливість і необхідність всебічного та ретельного вивчення геофізичних записів при вибухових НС. Незважаючи на великі відстані, сейсмоприпливними приладами надійно записані сейсмодеформаційні сигнали від вибухів у Балаклії та Калинівці. За цими записами зроблено спробу ідентифікації потужних вибухів, які генерують великі імпульсні сигнали. Створено основу

кореляційно-спектральної технології аналізу сейсмоприпливних записів, яка дає змогу виявляти і параметризувати вибухи. Показано, що в період подій-вибухів у поточних корелограмах кількість імпульсних сеймопакетів у десятки разів більша, ніж у записах. Це свідчить, що під час вибухів малої потужності на поточних корелограмах сигнали чітко виявляються, навіть на фоні шумів. Сигнали природного і техногенного походження добре розділяються за характером спектрограм.

Для надійнішої реєстрації вибухів, виявлення і параметризації сейсмодеформаційних явищ необхідно підвищити частоту дискретизації, точність і роздільну здатність систем реєстрації. Спостереження бажано виконувати поблизу цих небезпечних об'єктів. Дослідження важливі та необхідні не тільки для моніторингу вибухів боєприпасів, а й для контролю інших небезпечних геофізичних подій.

Робота виконана в рамках цільових прог-

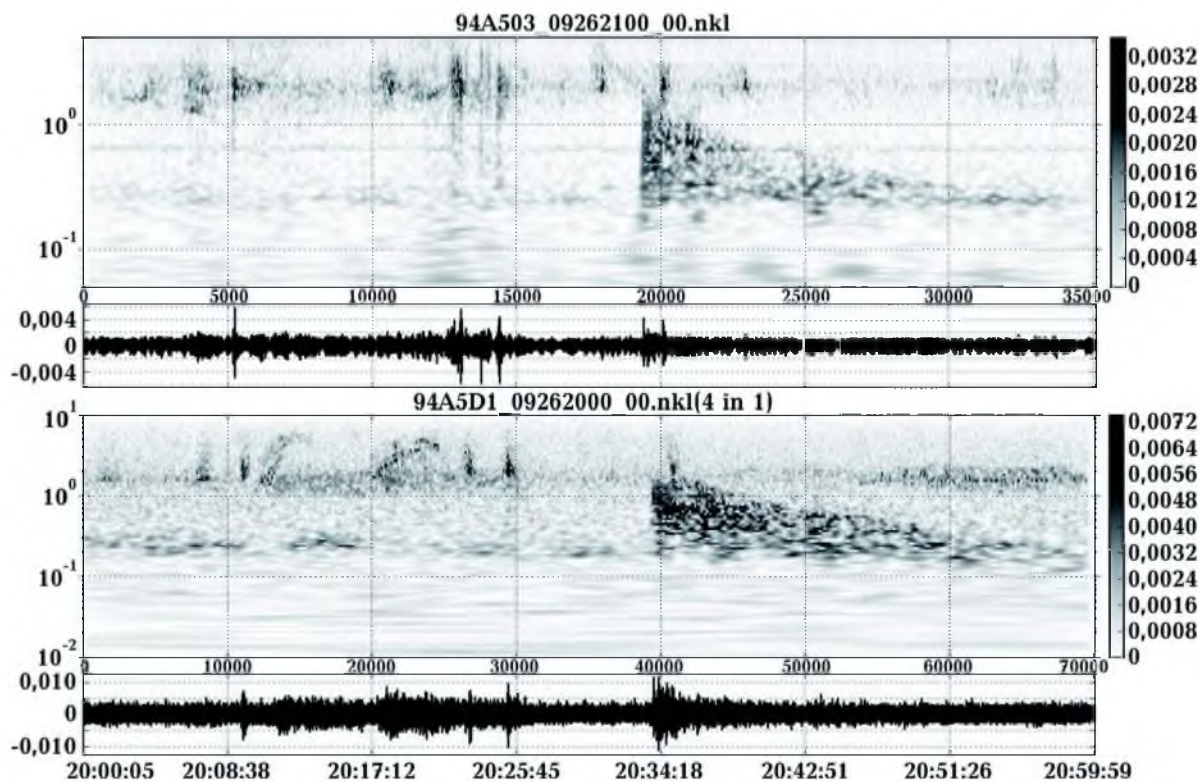


Рис. 8. Спектрограми сейсмічних записів 26.09.17 з 20:00 по 21:00 UTC. Вверху — сеймонахиломір; внизу — вертикальний сейсмометр.

рам ВНЗ "Проблеми геоecологiчної безпеки України" (2012—2016) та "Розвиток геологiчних, геофiзичних наук, ... в Ук-

раїні та вивчення, прогнозування і мінімізація надзвичайних ситуацій" (2017—2021).

Список літератури

- Ганженко Н. С., Зейкан О. Ю. Особливості глибинної будови центральної частини ДДЗ за даними інтегрального геолого-геофiзичного моделювання. *Геодинаміка*. 2011. № 2 (11). С. 58—60.
- Горбунова Э. М., Иванченко Г. Н., Санина И. А. Геолого-геофизические условия трасс распространения сейсмических волн от взрывов на карьерах. *Геодинаміка*. 2011. № 2 (11). С. 71—74.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Пек Й., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Днепроовско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін Пресс, 2006, 144 с.
- Кутас В. В., Андрущенко Ю. А., Калитова И. А. Промышленные взрывы и сейсмичность Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 165—172. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111055>.
- Соллогуб В. Б. Литосфера Украины. Киев: Наук. думка, 1986, 184 с.
- Старостенко В. И., Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Легостаева О. В., Савченко А. С. Плотностная неоднородность земной коры вдоль широтных зон разломов Украинского щита и Днепроовско-Донецкой впадины. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 6. С. 75—214. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i6.2012.116718>.
- Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске. *Геофиз. журн.* 2004а. Т. 36. № 4. С. 31—44.
- Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов боеприпасов на военной базе вблизи г. Мелитополь. *Геофиз. журн.* 2004б. Т. 36. № 6. С. 61—73.
- Чжань Ч. Х., Робинсон Э. А., Сильвия М. Т., Веглейн А. Б., Рич Э., Янг Р. П., Хилл Дж. Дж., Хейген Д. К., Кемерейт Р. К., Саттон А. Ф., Карлтон П. Н., Фидлер Р. У., Буа П., Андерсон К. Р., Ши-Хо Лю. Анализ и выделение сейсмических сигналов. Москва: Мир, 1986, 238 с.
- Шляховий В. В. Цифровий сейсмоприливний комплекс Полтавської гравіметричної обсерваторії: технологія спостережень. *Геодинаміка*. 2007. Т. 6. № 1. С. 60—66.
- Шумлянская Л. А., Трипольский А. А., Цветкова Т. А. Влияние скоростной структуры коры на результаты сейсмической томографии Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 95—117. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.116030>.

Studies of the poltava seismic-tidal records during the period of explosions events in Balakliya and Kalynivka

V. P. Shliakhovyi, R. V. Shyian, R. V. Shliakhovyi, 2019

The seismic-tidal records obtained at the Poltava gravimetric observatory of the IGF NAS of Ukraine (PGO) studied before, during and after events in Balakliya (March 22—23) and in Kalynivka (September 26—27) 2017 (explosions in ammunition dumps). Digital records were obtained with seismotiltmeters of compensating type and vertical seismometer (horizontal and vertical components), with thermal barograph and upgraded GS-11 gravimeter. Data analysis is performed by filtration, spectral, correlation and other methods, and the results are presented by graphs. The study of seismic deformation effects during explosions in military depots is a geophysical problem, the solution of which allows parameterize such dangerous events. However, despite its importance and social significance, it is not developed yet and needs additional studies. The analysis of the current-interval correlation functions and spectra shows that in the records up to 23:00 UTC 22.03.17 and 19:00 UTC on 26.09.17 (before the explosions), the correlation coefficients (K) for short test correlator sections are smaller than 0.2. That is, no significant correlation on the selected interval correlators is observed. The number of pulse-wave seismic packets after a specified time, increases substantially, and seismic packets become clearer in current-interval correlation functions. They also appear in places where because of the noise they are not visible on the primary records. The correlation coefficient between seismic packets in certain case, increases ($K > 0.6 \div 0.8$). This indicates the similarity of the pulsed wave packets and that they are generated in one place and have the same physical origin: obviously it is an explosion. The research has revealed the characteristic singularity of the seismodeformation signals during these events. A methodology for studying them has been developed. Many fundamental and applied problems have remained out-of range and must be investigated. Earth's crust interaction — atmospheric explosion, energy of charges and their influence on spectra, residual jumps — deformations, etc. have not been investigated because of limited resources.

Key words: explosions, Balakliya, Kalynivka, seismotiltmeter, correlation, spectrograms, energy, seismic signal.

References

- Ganzenko, N. S., & Zeykan, O. Yu. (2011). Features deep structure of the central part of the DDV based on the integrated data of geological and geophysical modeling. *Geodynamika*, (2), 58—60 (in Ukrainian).
- Gorbunova, E. M., Ivanchenko, G. N., & Sanina, I. A. (2011). Geological and geophysical conditions of traces of the distribution of seismic waves from explosions on open pits. *Geodynamika*, (2), 71—74 (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgornyaya, O. V., Kovachikova, S., Logvinov, I. M., Pek, Y., Tarasov, V. N., & Usenko, O. V. (2006). Dnieper-Donets Depression (geophysics, deep-seated processes). Kiev: Korvin Press, 144 p. (in Russian).
- Kutas, V. V., Andrushchenko, Yu. A., & Kalitova, I. A. (2014). Industrial explosions and seismic activity of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36 (6), 165—172. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111055> (in Russian).
- Sollogub, V. B. (1986). *Lithosphere of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 184 p. (in Russian).
- Starostenko, V. I., Kuprienko, P. Ya., Makaren-

- ko, I. B., Legostaeva, O. V., & Savchenko, A. S. (2012). Density inhomogeneity of the Earth's crust along latitudinal zones of the faults of the Ukrainian Shield and the Dnieper-Donets basin. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(6), 75—214. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i6.2012.116718> (in Russian).
- Chernogor, L. F. (2004a). Geophysical effects and ecological consequences of fire and explosions of ammunition at a military base near Melitopol. *Geofizicheskiy zhurnal*, 26(6), 61—73 (in Russian).
- Chernogor, L. F. (2004b). Geophysical effects and ecological consequences of multiple chemical explosions at ammunition dumps in Artemovsk. *Geofizicheskiy zhurnal*, 26(4), 31—44 (in Russian).
- Chan, C. H., Robinson, E. A., Sylvia, M. T., Weglein, A. B., Rich, E., Young, R. P., Hill, J. J., Hagen, D. K., Kemereit, R. K., Sutton, A. F., Carlton, P. N., Fidler, R. U., Bua, P., Anderson, K. R., Shiho Liu (1986). *Seismic signal analysis and discrimination*. Moscow: Mir 278 p. (in Russian).
- Shliakhovyi, V. V. (2007). Digital seismotidal complex of Poltava gravimetric observatory: technology of supervision. *Geodynamika*, 6(1), 60—66 (in Ukrainian).
- Shumlyanskaya, L. A., Tripolskiy, A. A., & Tsvetkova, T. A. (2012). Crustal velocity structure effects on the results of seismic tomography of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(4), 95—117. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.116030> (in Russian).