

УДК: 550.34

DOI: 10.33099/2311-7249/2025-52-1-5-12

ЧУМАЧЕНКО Сергій Миколайович,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Державний науково-дослідний інститут авіації Міністерства оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-8894-4262>

ДЕЙНЕГА Олександр Васильович,

доктор військових наук, професор,
Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-2371-3252>

КОРНІЄНКО Ігор Валерійович,

Центральне управління військової освіти і науки Генерального штабу Збройних Сил України, Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-8712-404X>

ОСАДЧИЙ Володимир Іванович,

Головний центр спеціального контролю Державного космічного агентства України, Житомир, Україна
<https://orcid.org/0009-0008-3837-2471>

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЯДЕРНОГО ВИБУХУ НА ОСНОВІ РЕЄСТРАЦІЇ Й АНАЛІЗУ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ

У статті розглянуто питання ефективного функціонування системи геофізичного моніторингу Головного центру спеціального контролю, який призначений для контролю за дотриманням міжнародних договорів про заборону ядерних випробувань.

Мета статті. На основі аналізу існуючих підходів до оцінки потужності ядерних вибухів провідними сейсмологічними службами та досвіду оцінки потужності підземних ядерних вибухів із випробувального полігону Північної Кореї, уточнити калібрувальні функції для розрахунку магнітуди за об'ємною P хвилею для подальшого отримання достовірних даних про потужність ядерних вибухів.

Методи дослідження. У статті використані методи: контент-аналізу – для дослідження досвіду випробувань та наявних документів з оцінювання потужності ядерних вибухів; системного аналізу – для формування науково-методичних підходів, окреслених у статті; методи математичної статистики – для визначення статистичної залежності між магнітудою і потужністю вибухів; аналітичні методи – для уточнення формул розрахунку калібрувальної функції до вертикальних компонент короткоперіодних P -хвиль та емпіричних залежностей стосовно оцінювання потужності ядерних вибухів.

Отримані результати дослідження. У роботі розглянуто сучасні підходи до оцінювання потужності підземних ядерних вибухів на основі реєстрації та аналізу коливань земної поверхні, яка може вказувати на рівень розвитку ядерних технологій держави, яка приховано проводить ядерні випробування, не зважаючи на договори про нерозповсюдження ядерної зброї. Відмічається, що реєструюча апаратура має мати таку амплітудно-частотну характеристику, яка забезпечує реєстрацію без спотворень повздовжніх, поперечних і поверхневих хвиль. Вирішення цієї задачі досягається або за використання широкосмужових приладів із великим динамічним діапазоном, або за допомогою декількох сейсмічних каналів, що мають менший динамічний діапазон, але які перекривають весь необхідний інтервал робочих частот. Крім того, у статті проаналізовано останні дослідження із відкритих джерел, які вказують, що точне визначення потужності підземних ядерних вибухів суттєво залежить від значення магнітуди сейсмічних джерел від вибухів, що, в свою чергу, не дає змоги застосувати ефективні алгоритми для її оцінювання.

Елементи наукової новизни. Для оцінювання магнітуди сейсмічних джерел від ядерного вибуху за даними пунктів спостереження Головного центру спеціального контролю було уточнено калібрувальні функції для розрахунку магнітуди з використанням вертикальних компонент короткоперіодних P -хвиль, в результаті чого, була підвищена точність оцінки потужності підземних ядерних вибухів із випробувального полігону Північної Кореї.

Теоретична та практична значущість статті. На практиці підтверджено, що отримані оцінки потужності підземних ядерних вибухів корелюються із значеннями, які розраховані провідними світовими сейсмологічними службами. Практична значущість статті зводиться до можливості використання запропонованих науково-методичних підходів до оцінювання потужності ядерного вибуху, застосування перспективних зразків сейсмічної зброї на основі реєстрації та аналізу сейсмічних сигналів у процесі визначення параметрів сейсмічних подій з інших регіонів, зокрема, випробувальних полігонів, розробку пропозицій щодо автоматизації процесів обробки інформації з метою зменшення часу на прийняття рішень тощо.

Ключові слова: ядерний вибух, потужність ядерного вибуху, реєстрація та аналіз параметрів сигналів, магнітуда, калібрувальна функція, камуфлетний підземний ядерний вибух, добротність.

Вступ

На сьогоднішній день, через наростання ядерних загроз через подальше збільшення кількості випробувань новітніх зразків ядерної зброї, набувають великого значення системи контролю за їх проведенням з використанням сучасних зразків високочутливого обладнання. В Україні такі системи є в Головному центрі спеціального контролю, що підпорядкований Державному космічному агентству України. Система геофізичного моніторингу Головного центру спеціального контролю (далі – ГЦСК) являють собою комплекс сил та засобів, зокрема, радіотехнічних, сейсмічних, інфразвукових, магнітних та радіонуклідних, що призначені для контролю за дотриманням міжнародних вимог щодо випробування ядерної зброї. Використання комплексного підходу до оцінювання параметрів підземних ядерних вибухів підвищує достовірність та точність оцінювання за відповідними фізичними показниками, що фіксуються в ГЦСК.

Постановка проблеми. Основною вимогою до технічних засобів моніторингу та чергової зміни є постійна готовність до реєстрації та оперативний аналіз параметрів ядерних вибухів (далі – ЯВ) (час та місце події, потужність тощо) з метою своєчасного та достовірного інформування споживачів інформації, зокрема, складових сектору безпеки і оборони. Потужність ЯВ може вказувати на рівень розвитку ядерних технологій, саме тому держави, які ними володіють, приховано проводять підземні ядерні вибухи (далі – ПЯВ), не зважаючи на договори про нерозповсюдження ядерної зброї.

Враховуючи агресивний характер сучасної геополітики, слід надавати значну увагу розвитку засобів і мережі моніторингу ЯВ для більш точного і своєчасного оцінювання розвитку ядерних технологій держав, які порушують міжнародні вимоги щодо проведення ядерних випробувань. В цих умовах, набувають значної актуальності засоби сейсмічного моніторингу ГЦСК, які базуються на реєстрації коливань земної поверхні, внаслідок подій техногенного або природного походження.

Відомо, що ПЯВ моделюється у вигляді сферичного симетричного точкового джерела типу розширення, який в ідеалізованому безмежному однорідному та ізотропному середовищі був би джерелом тільки поздовжніх хвиль [1; 2]. Однак, в реальному шаруватому середовищі, що містить неоднорідності, діаграма випромінювання сейсмічних коливань за ЯВ може істотно відрізнитися від такої ідеалізованої моделі, що значно впливає на достовірність отриманих результатів. Процес вивільнення напруг, накопичених в середовищі під час проведення ПЯВ теж може ускладнювати сейсмічне хвильове поле, що спостерігається. За ПЯВ інтенсивна ударна хвиля за високих температур і тиску розплавляє та випаровує породи в безпосередній близькості від вибухового джерела і утворює підземну порожнину внаслідок стиснення розплавлених порід. Цей процес збудження ПЯВ розділяється на чотири фази [1]:

ядерні реакції, під час яких за кілька мікросекунд

проходить виділення майже всієї енергії вибуху, і температура досягає 1 000 000 °С, а тиск біля 7 000 000 атм;

гідродинамічна фаза, під час якої відбувається плавлення і розширення порід, що оточують заряд, утворюється порожнина внаслідок стиснення розплавлених порід;

статичний вплив, під час якого, внаслідок падіння тиску в порожнині, відбувається обвалення її стінок і утворення конусу обвалення вище порожнини;

герморадіаційний наслідок, під час якого завершується формування зони обвалення, відбувається розсіювання тепла і розпад радіоактивних продуктів. Тривалість цієї фази залежить від впливу багатьох чинників і може вимірюватися днями, місяцями і навіть роками.

Енергія ПЯВ передається в навколишнє середовище у вигляді хвиль стиснення. Ударні хвилі руйнують породи поблизу джерела і генерують пружні сейсмічні коливання поза зоною непружних деформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як свідчить аналіз останніх досліджень, у цій сфері спостерігається значний розвиток, що обумовлено інноваційною приладною базою, сучасними апаратно-програмними засобами моніторингу, залученням даних дистанційного зондування з борту космічних апаратів і т.ін. Зі швидким розвитком сучасних сейсмічних мереж широкосмугові цифрові сейсмограми на станціях із високою щільністю сприяли широкому застосуванню методів регіонального моніторингу.

У науковій праці [1] розглядаються питання етапів виявлення сигналів на окремій станції та сейсмічній групі, загальних підходів до визначення параметрів сейсмічних джерел і факторів, які впливають на точність оцінювання магнітуди та потужності вибухів.

У дослідженні [2] проаналізовано можливості реєстрації та визначення енергетичних характеристик сейсмічних сигналів, у тому числі параметрів ЯВ, які зареєстровані сейсмічною станцією SPITS (Шпітсберген) з району Нової Землі.

У роботах [1–3] досліджені лінійні розміри порожнини і зони руйнувань, які залежать від потужності ЯВ, глибини закладення заряду тощо.

В статті [4] із Лос-Аламоської лабораторії (США) було детально розглянуто питання із застосування класичної моделі Мюллера та Мерфі для джерела ПЯВ. У ній зазначено, що визначити розмір і глибину підземного ядерного вибуху лише за допомогою спостережень за сейсмічними показниками, спричиненими його детонацією, досить важко. Оптимальним було б, щоб тестовий майданчик спочатку відкалібрували за допомогою вибуху з відомою глибиною та розміром. Однак для багатьох об'єктів, що становлять інтерес, ця інформація є недоступною.

Зазначене свідчить, що визначення параметрів підземних вибухів залишається складним завданням, що вимагає проведення комплексу заходів та впровадження нових методів верифікації та оцінювання зазначених параметрів. Це підкреслює важливість подальших досліджень у цій сфері, та свідчить про

актуальність обраної теми статті.

Північна Корея провела шість анонсованих підземних ядерних випробувань у період з 9 жовтня 2006 року по 17 вересня 2017 року (таблиця 1). Кожен із цих вибухів стався на ядерному полігоні Пунгері,

розташованому поблизу гори Мантап (41,3° пн. ш., 129,1° сх. д., рис. 1), надалі іменованому комплексом північнокорейського випробувального полігону (NKTS) [4; 10].

Таблиця 1

Оцінені параметри походження для кожного із задекларованих ядерних випробувань та 95% еліпси похибки* [4]

Назва параметру	Ядерні випробування					
	NK1	NK2	NK3	NK4	NK5	NK6
Дата (Date)	09.10.2006	25.05.2009	12.02.2013	06.01.2016	09.09.2016	03.09.2017
Світовий час (UTC)	01:35:27,794	00:54:42,957	02:57:51,115	01:30:00,825	00:30:01,143	03:30:01,488
Широта (lat.)	41,288624	41,295270	41,293223	41,299190	41,299942	41,298840
Довгота (Lon.)	129.109951	129.083951	129.079708	129.075859	129.080921	129.080460
Велика піввісь (Major)	0,19	0,15	0,14	0,15	0,10	0,23
Мала піввісь (Minor)	0,13	0,10	0,11	0,10	0,06	0,13
Напрямок (Strike)	71.5	128.1	101.5	102.3	90.6	98,6
Глибина вибуху (DoB), м	430	600	430	710	710	710

*Примітка. Довжина великої та малої напіввісей подається в кілометрах, а напрямок – у градусах проти годинникової стрілки з півночі. Відносні місцезнаходження мають точність до – 150 м. Неможливо визначити глибини через відсутність обмежень, спричинених цими диференціальними часами проходження. Бажані глибини проведення вибухів вказуються в метрах і топографічно обмежені, припускаючи 4% ухилу тунелю закладки.

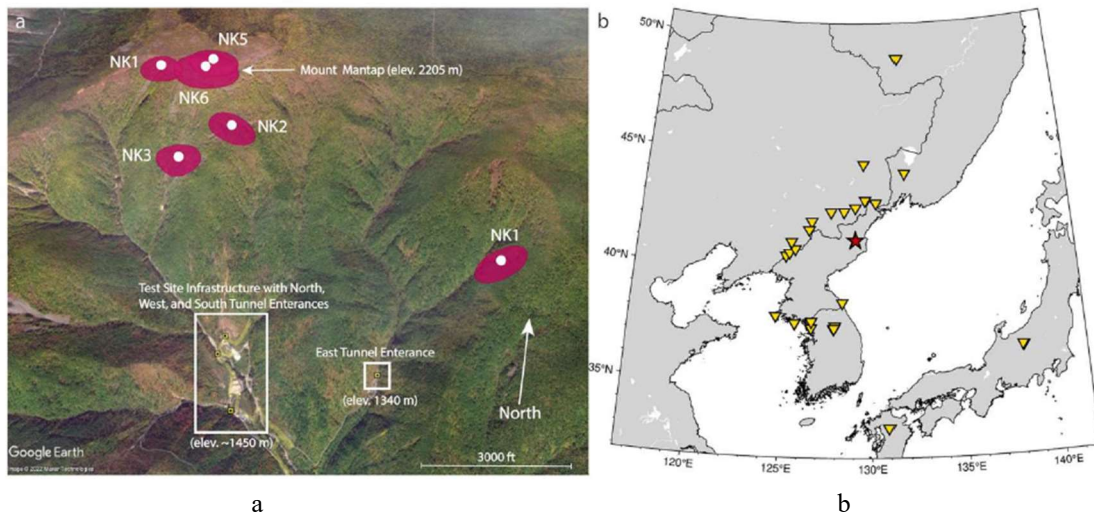


Рисунок 1 – Відносне розташування задекларованих ядерних випробувань КНДР, комплексу північнокорейського полігону і станцій [4].

а – білі кола позначають окремі відносні місця розташування, пурпурові еліпси – відповідні еліпси похибок, квадрати – місця розташування Північного, Західного, Південного та Східного входів на полігон;
 б – жовті трикутники позначають місця розташування станцій, червона зірка – місце розташування випробувального майданчика.

Щоб охарактеризувати ці некалібровані підземні вибухи, використовують сейсмічні хвилі, що вимірюють датчиками, які розташовані в межах ~1000 км від випробувального майданчика, щоб визначити «спектральне співвідношення». Ці спектральні

співвідношення коли використовують вимірювання двох вибухів, які були зареєстровані одним сейсмічним датчиком і обидва сталися приблизно в тому самому місці, щоб усунути зміни сейсмічної хвилі, спричинені скелею, коли хвиля проходила через земну кору від

місця вибуху до місця розташування датчика. Отримане вимірювання є оцінкою кількості енергії, створеної вибухом для кожної частоти вібраційної хвилі, яка випромінюється від вибухів. Розмір цих ядерних випробувань потім визначався шляхом підгонки фізичних моделей вибухів до отриманих даних. Однак, для такого аналізу залишаються проблеми і, зокрема, особливо складно отримати надійні оцінки потужності (W) для тестових майданчиків, для яких у нас відсутні прямі сейсмічні калібрувальні експерименти.

Враховуючи зазначене, актуальним науковим завданням є дослідження особливостей реєстрації, виявлення, ідентифікації та визначення параметрів ЯВ, зареєстрованих мережею станцій ГЦСК, зокрема, з випробувального полігону Хваде, Північна Корея. Питання щодо точного визначення потужності вибухів залежить від значення магнітуди сейсмічних джерел від ПЯВ з урахуванням вище зазначених факторів, що в свою чергу не дає змоги застосувати ефективні алгоритми для її оцінки. У сейсмічному ядерному моніторингу, побудова моделі ослаблення є важливою передумовою для надійної оцінки вибухової потужності в некаліброваній області. Цей підхід можна використати для оцінювання вихідної потужності ПЯВ, оскільки можна точно врахувати ефекти загасання на шляху розповсюдження.

Україна, як підписант Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (далі – ДВЗЯВ), взяла на себе міжнародні зобов'язання щодо контролю за ЯВ національними технічними засобами та забезпечення функціонування об'єктів Міжнародної системи моніторингу, зокрема, сейсмічної станції PS45, що робить зазначені питання особливо актуальними для сьогодення.

Мета статті. На основі аналізу існуючих підходів до оцінки потужності ядерних вибухів провідними сейсмологічними службами та досвіду оцінки потужності підземних ядерних вибухів з випробувального полігону Північної Кореї, уточнити калібрувальні функції для розрахунку магнітуди за об'ємною P хвилею для подальшого отримання достовірних даних про потужність ядерних вибухів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сейсмічні методи оцінки потужності ПЯВ засновані на замірах амплітуди сейсмічних сигналів, попередньо відкаліброваних на вибухах. Розроблені на теперішній момент методи розділяють на дві групи [1]:

методи, для застосування яких необхідна інформація про умови проведення ПЯВ (тип породи, глибина і т. ін.). Такі методи, практично, є полігонними і можуть використовуватися для оцінок потужності ЯВ тільки за наявності такої інформації;

методи, за яких інформація про умови проведення ПЯВ встановлюється шляхом аналізу спектрально-часових характеристик записів сейсмічних сигналів, і які можуть застосовуватись для оцінки ПЯВ в ході контролю дотримання ДВЗЯВ.

Потужність ПЯВ прийнято оцінювати в одиницях тротилового еквівалента. Якщо ПЯВ має потужність 1 кт, то це означає, що при цьому вибуху виділилась енергія рівна $4,2 \times 10^{19}$ ерг (або $4,2 \times 10^{12}$ Дж), еквівалентна енергії, що виділяється при хімічному вибуху в 1000 т тринітотолуолу (далі – ТНТ). Сейсмічні методи оцінки потужності ЯВ засновані на вимірюваннях амплітуди сейсмічних сигналів, заздалегідь прокаліброваних по вибухам відомої потужності. Із збільшенням потужності Y вибуху зростає і амплітуда A зареєстрованого сейсмічного сигналу. Залежність амплітуди A від потужності ЯВ для короткоперіодичних сигналів з частотою 1 Гц і більше (P -хвилі) нелінійна. Оскільки інтенсивність сигналу залежить від відстані до епіцентру і глибини джерела, потужність прийнято оцінювати не за амплітудою, а за магнітудою вибуху, яка не залежить від даних чинників. Обчислення потужності ЯВ проводиться з використанням: магнітуди m_b P -хвилі; магнітуди поверхневої хвилі M_s ; магнітуди $m_b(L_g)$ Lg -хвилі.

Магнітудні шкали дають змогу оцінювати енергію вибухів на різних відстанях. Потужність ЯВ оцінюється з використанням результатів реєстрації засобів сейсмічного моніторингу із заздалегідь знайденої статистичної залежності між магнітудою $mb(M)$ і потужністю Y вибухів [1]:

$$mb = aLgY + b \quad (1)$$

де Y – потужність ЯВ в кт (т);

a – нормований коефіцієнт;

b – коефіцієнт, який залежить від властивостей порід, в яких проводяться вибухи.

На точність вимірювання потужності ЯВ впливають: точність визначення параметрів, що входять в формулу (1) (розрахункова помилка);

умови в джерелі (фізико-механічні властивості порід, глибини розташування заряду);

умови в місці реєстрації (будова і властивості середовища під станцією спостереження (СВП));

характеристики реєструючої апаратури (динамічного діапазону і робочої смуги частот);

шляхи розповсюдження сейсмічного сигналу від сейсмічного джерела до станції по конкретній трасі (систематична помилка).

Реєструюча апаратура має мати таку амплітудно-частотну характеристику, яка забезпечує реєстрацію без спотворень повздовжніх, поперечних і поверхневих хвиль. Вирішення цієї задачі досягається або під час використання широкосмугових приладів з великим динамічним діапазоном, або за допомогою декількох сейсмічних каналів, що мають менший динамічний діапазон, але перекривають весь необхідний інтервал робочих частот. Сейсмічні засоби дають змогу достатньо надійно реєструвати практично в будь-якій точці земної кулі вибухи потужністю в декілька кілотонн. Оцінки сейсмічного ефекту ПЯВ залежать від конкретних типів гірських порід, в яких проводяться вибухи (табл. 2).

Таблиця 2

Оцінка сейсмічного ефекту підземних ядерних вибухів у щільних і пухких породах [1]

E _{0x4,2} , ерг	Y, кт ТНТ	Сейсмічний ефект η , %	
		Щільне середовище	Пухке середовище
10 ¹⁹	1	0,35	0,1
10 ²⁰	10	1,0	0,15
10 ²¹	100	2,8	0,2
10 ²²	1 000	4,2	0,3
10 ²³	10 000	4,4	-

Отже, сейсмічна ефективність визначення ЯВ в пухких породах варіює в межах 0,1–0,3 %, в щільних породах – 1–4 %. Інтервал 0,4–1 % відповідає проміжним умовам. Залежно від властивостей порід коефіцієнт η може змінюватися на порядок і при сильних вибухах має значення, близькі до оцінок для щільних порід і складає близько 5 %. Видима за телесеїсмічними даними залежність коефіцієнта η від потужності ЯВ обумовлена, мабуть поглинанням високих частот в міру віддалення від джерела. Цей ефект приводить до заниження значень η . Найбільш виразно це проявляється під час проведення малих ЯВ. Крім того, коефіцієнт η може дещо зростати зі збільшенням потужності ЯВ за рахунок зростання акустичної жорсткості (ρV_p) порід одного й того ж типу при збільшенні глибини їх проведення.

У міру поширення від джерела до станції відбувається затухання сейсмічної енергії об'ємних і поверхневих хвиль внаслідок таких ефектів, як геометрична розбіжність і розсіювання на неоднорідностях. Чим менша довжина хвилі коливань, тим швидше вони загасають з відстанню, зустрічаючи на своєму шляху неоднорідності рівні або більші за довжину хвилі. Загальна тенденція полягає в тому, що на великих відстанях високочастотні складові в спектрі хвиль згасають і записи стають більш низькочастотними.

Вимірюючи загасання сейсмічних хвиль на різних періодах коливань можна оцінити непружні властивості земної кори і мантії. Цей метод заснований на вимірюванні амплітуд сейсмічних коливань на різних відстанях від джерела. В результаті необхідно ввести поправку, що враховує геометричну розбіжність енергії шляхом поширення хвилі. Величина загасання, що залишається після цього цілком відповідає непружним процесам і дозволяє оцінити величину добротності середовища Q. Добротність залежить від частоти сигналу, а в експериментальних дослідженнях оцінюють ефективну добротність [1]:

$$Q^*(f) = Q_0 f^\alpha, \quad (2)$$

де Q_0 – добротність на частоті 1 Гц.

Параметр $Q^*(f)$ характеризує сумарний вплив на сейсмічне коливання поглинання і розсіювання в залежності від частоти коливань, а коефіцієнт α у виразі (2) може бути різним в регіонах, в залежності від будови і складу гірських порід.

Наприклад, для:

Невадського випробувального полігону (НВП)

$$Q^*(f) = 257,8 f^{0,34} \quad [1];$$

Семіпалатинського випробувального полігону (СВП) $Q^*(f) = 336,9 f^{0,48}$;

випробувального полігону на Новій Землі (НЗВП)

$$Q^*(f) = 325 f^{0,48} \quad [2];$$

випробувального полігону в Північній Кореї

$$Q^*(f) = 317(\pm 14) f^{0,343(\pm 0,024)} \quad [3].$$

Під час проведення ПЯВ глибина закладення зарядів h (м) підбирається залежно від міцності порід і потужності заряду в кт ТНТ так, щоб забезпечити камуфлетні умови (без викиду радіоактивних продуктів в атмосферу) [1]:

$$h = a Y^{1/3}. \quad (3)$$

Тому, у формулі (3) коефіцієнт a (приведена глибина) залежить від міцності порід. Глибина проведення ПЯВ знизу обмежується технічними можливостями буріння надглибоких свердловин і не може перевершувати глибину близько 10 км.

Найбільш потужні ПЯВ мегатонного калібру були проведені на глибинах порядку 1–2 км. Зокрема, вибух «Вохсаг» на НВП потужністю 1200 кт ТНТ проведено на глибині 1158 м, вибух «Саннісін» потужністю <5000 кт ТНТ на острові Амчитка – на глибині 1789 м. Для НВП $a = 122$ м/кт^{1/3}, для НЗВП $a = 120$ м/кт^{1/3} [2] і для випробувального полігону в Північній Кореї (ПКВП) $a = 130$ м/кт^{1/3} [5].

Оскільки ядерний випробувальний полігон у Північній Кореї не відкалібрований, існують проблеми з погляду абсолютної величини вибуху та оцінювання потужності. Проаналізувавши дані за оцінкою магнітуди та потужності ЯВ основних сейсмологічних служб з полігону Пунгері, порівнявши кількісні показники ефективної добротності, приведену глибину для НВП, СВП, НЗВП та ПКВП на даний момент актуальним є питання щодо точного визначення магнітуди сейсмічних джерел від ПЯВ та вибір алгоритму для оцінки їх потужності для пунктів спостереження ГЦСК. Для оцінки магнітуди сейсмічних джерел від ЯВ з ПКВП за даними пунктів спостереження (далі – ПС) ГЦСК (табл. 3) для розрахунку калібрувальної функції з використанням вертикальних компонент короткоперіодних P -хвиль (рис. 2) було отримано залежність:

$$\sigma(\Delta^0) = 0,0067 \Delta^0 + 3,0333, \quad (4)$$

де Δ^0 – епіцентрально відстань до місця проведення ядерного вибуху на ПКВП в градусах.

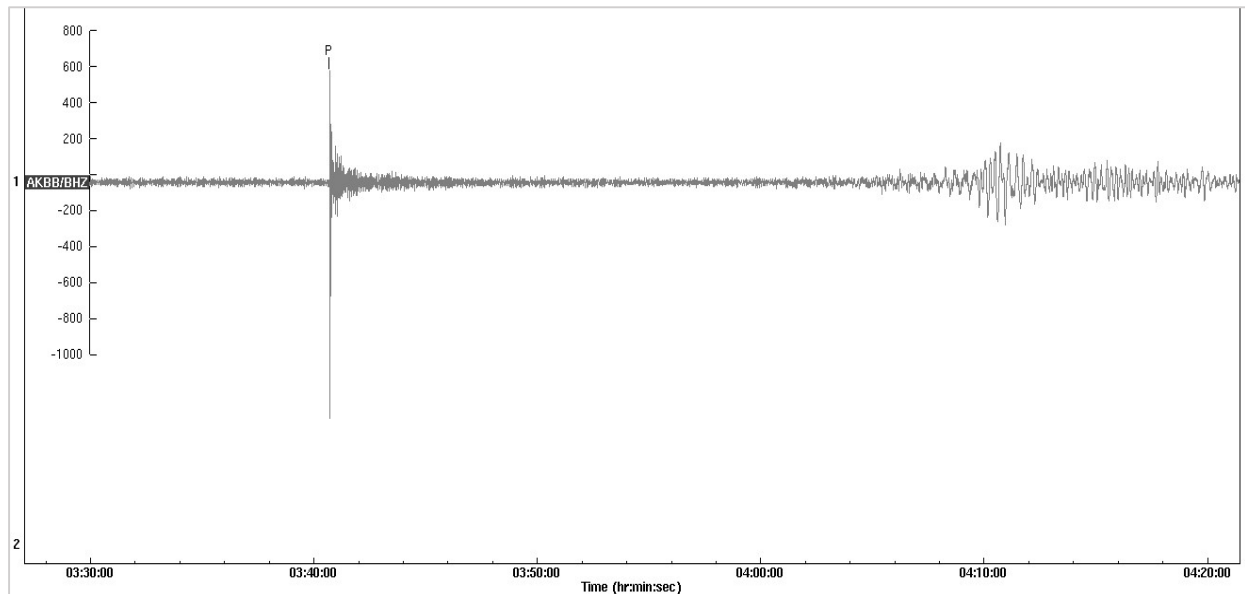


Рисунок 2 – Запис сейсмічного сигналу від підземних ядерних вибухів 03 вересня 2017 року на випробувальному полігоні Північної Кореї, отриманий з використанням вертикальної компоненти (AKBBz) сейсмічної станції PS45

Таблиця 3

Значення калібрувальної функції $\sigma(\Delta^\circ)$ для пунктів спостереження Головного центру спеціального контролю для оцінки магнітуди підземних ядерних вибухів 03 вересня 2017 року

Пункт спостереження	«Ворсівка»	«Кам'янець-Подільський»	«Балта»	«Любар»	«Кам'яний Брід»
$\sigma(\Delta^\circ)$	3,466	3,4841	3,4753	3,474	3,4718
Пункт спостереження	«Підлуби»	«Зелениця»	«Ужгород»	«Харків»	«Полтава»
$\sigma(\Delta^\circ)$	3,4704	3,4793	3,4982	3,4723	3,451

Магнітуда по об'ємній короткоперіодній P -хвилі визначається за формулою [5]:

$$mb = Lg(A/T) + \sigma(\Delta^0), \quad (5)$$

де A – максимальна амплітуда P -хвилі в $нм$,

T – період, що відповідає максимальній амплітуді в $сек$.

Магнітуда по поверхневій довгоперіодній LR -хвилі [5]:

$$Ms = Lg(A/T) + 1.66Lg(\Delta^0) + 0,3, \quad (6)$$

де A – максимальна амплітуда LR -хвилі в $нм$,

T – період, що відповідає максимальній амплітуді в $сек$,

Δ^0 – епіцентрально відстань.

Для переходу від магнітуди Ms , визначеній по поверхневій хвилі, до магнітуди mb , визначеній по об'ємній хвилі, для ПКВП рекомендується таке співвідношення [3]:

$$Ms = 1.25mb - 2,2. \quad (7)$$

У табл. 4 авторами наведені значення магнітудних оцінок для ПС ГЦСК від ЯВ 03 вересня 2017 року на ПКВП.

Таблиця 4

Значення магнітудних оцінок для пунктів спостереження Головного центру спеціального контролю від підземних ядерних вибухів 03 вересня 2017 року

Пункт спостереження	«Ворсівка»	«Кам'янець-Подільський»	«Ужгород»
Магнітуда mb	6,4	6,5	5,7
Пункт спостереження	«Любар»	«Кам'яний Брід»	«Зелениця»
Магнітуда mb	6,3	6,3	6,4

Магнітуда по поверхневій довгоперіодній LR -хвилі з використанням даних вертикальної компоненти (AKBBz) сейсмічної станції PS45 від ПЯВ 03 вересня 2017 року на ПКВП оцінена за допомогою співвідношення (6) $Ms = 5,4$. Використавши

співвідношення (7), значення магнітуди по об'ємній короткоперіодній P -хвилі $mb = 6,1$. Остаточне рішення по оцінці магнітуди $mb = 6,2$. Для оцінки потужності ПЯВ на ПКВП запропоновані співвідношення [2], [7-9]:

$$Y = 10^{(mb-4,45)/0,75}; \quad (8)$$

$$Y = 10^{(mb-4,25)/0,75}; \quad (9)$$

Для оцінки потужності, з урахуванням глибини закладання заряду, використовується співвідношення [9]:

$$Y = 10^{(mb-5,887+0,7875Lg(h))/1}; \quad (10)$$

де h – глибина закладання заряду.

Кінцеве рішення по оцінці потужності ПЯВ 03 вересня 2017 року з використанням даних пунктів спостереження ГЦСК складає $Y = 200 - 400$ кт. В свою чергу, Федеральний інститут геофізики та природних ресурсів надав верхню оцінку потужності в кілька сотень кілотонн, виходячи з магнітуди 6,1. Незалежне агентство з моніторингу сейсмічної активності NORSAR, спираючись на оцінку магнітуди події 6,1 оцінило потужність ЯВ 200 – 300 кт. Експерти американського Університету Джона Хопкінса з посиланням на дані отримані на сейсмостанції в казахстанському Актюбінську, які надала Організація договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань, оцінили потужність біля 250 кт та Організація договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань дала власну оцінку потужності, яка склала 100–600 кт.

Список бібліографічних посилань

1. Кедров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Изд-во ИФЗ РАН : Москва. Саранск, 2005. С. 20–22, 26, 27, 39–42, 244–246. 2. Bowers D., Marshall P.D. and Douglas, A. The level of deterrence provided by data from the SPITS seismometer array to possible violations of the Comprehensive Test Ban in the Novaya Zemlya region, *Geophysical Journal International*. 2001. № 146. P. 425–438. 3. Chun K. Y., and Henderson G. A. Lg Attenuation near the North Korean Border with China, Part II: Model Development from the 2006 Nuclear Explosion in North Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. № 99(5). P. 3030–3038. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120080341>. 4. Delbridge B. G., Carmichael J. D., Phillips W. S., Cleveland K. M., Begnaud M. L., & Gammans C. Source characterization of the declared North Korean nuclear tests from regional distance coda wave spectral ratios. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023. № 128. P. 1–32. 5. Murphy J. R., Kohl B. C., Stevens J. L., Bennett T. J., Israelsson H. G. Final Technical Report. Under DOS Contract No. SAQMMA09C0250 (01 September 2009 – 31 August 2010). URL:

Висновки й перспективи подальших досліджень

У статті розроблено науково-методичні підходи до оцінювання потужності ядерного вибуху на основі реєстрації та аналізу сейсмічних сигналів та математичних моделей ефективної добротності і магнітуди сейсмічних хвиль.

На основі аналізу записів підземних ядерних вибухів із випробувального полігону Північної Кореї уточнені формули розрахунку калібрувальної функції для вертикальних компонент короткоперіодних P -хвиль, вибрані емпіричні залежності для оцінювання потужності підземних ядерних вибухів із випробувального полігону Північної Кореї, що підвищило достовірність надання оперативної інформації.

На практиці підтверджено, що отримані оцінки потужності корелюються із значеннями, які розраховані провідними світовими сейсмологічними службами.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оцінку ефективності запропонованих підходів під час визначення параметрів сейсмічних подій з інших регіонів, розробки пропозицій щодо автоматизації процесів з метою зменшення часу на прийняття рішень тощо.

<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA628639.pdf> (Accessed: 10 January 2025). 6. Шаров Н. В., Маловічко А. А., Щукін Ю. К. Землетруси і мікросейсмічність в задачах сучасної геодинаміки Східно-Європейської платформи. Кн. 2: Мікросейсмічність. Петрозаводськ: Карельський науковий центр РАН, 2007. С. 19. 7. Ringdal F., Marshall P. D. and Alewine R. W. Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site, *Geophysical Journal International*. 1992. № 109. P. 65–77. 8. Bönnemann C., Ceranna L. and Hartmann G. The 2013 North Korean nuclear test. Hannover (Germany) : Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), 2013. 9. Zhao L., Xie X.-B., Wang W., and Yao Z.-X. Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion. *Bulletin of the Seismological Soc.* 2012. Am. 102. P. 467–478. DOI: 10.1785/0120110163 10. Zhang M. and Wen L.X. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test. *Geophysical research letters*. 2013. № 40. P. 2941–2946. DOI: 10.1002/grl.50607.

APPROACHES TO ESTIMATING THE POWER OF A NUCLEAR EXPLOSION BASED ON THE REGISTRATION AND ANALYSIS OF SEISMIC SIGNALS

CHUMACHENKO Serhii, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-8894-4262>

DEINEHA Oleksandr, Doctor of Military Sciences, Professor, Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-2371-3252>

KORNIENKO Ihor, Central department of military education and science of the General staff of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0006-8712-404X>

OSADCHYI Volodymyr, Main centre of special monitoring of the National space facilities control and test center of the State Space Agency of Ukraine, Zhytomyr, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0008-3837-2471>

Formulation of the problem in general. This work is devoted to the issues of effective functioning of the geophysical monitoring system of the Main Center for Special Control, which is designed to monitor compliance with international treaties on the prohibition of nuclear tests.

Research methods. The article uses the following methods: content analysis – to analyse test experience and available documents on nuclear explosion power assessment; system analysis – to formulate the scientific and methodological approaches outlined in the article; methods of mathematical statistics – to determine the statistical relationship between the magnitude and power of explosions; analytical methods – to refine the formulas for calculating the calibration function for the vertical components of short-period P waves and empirical dependencies for assessing nuclear explosion power.

Analysis of recent researches and publications. Determining the parameters of underground explosions remains a complex task that requires a set of measures and the introduction of new methods for verifying and evaluating these parameters. This emphasises the importance of further research in this area and the relevance of the chosen topic of the article.

Presenting the main material. The work considers modern approaches to assessing the power of underground nuclear explosions based on the registration and analysis of vibrations of the earth's surface, which may indicate the level of development of nuclear technologies of a state that secretly conducts nuclear tests, despite treaties on the non-proliferation of nuclear weapons. It is noted that the recording equipment must have such an amplitude-frequency characteristic that ensures the registration without distortion of longitudinal, transverse and surface waves. The solution of this problem is achieved either by using broadband devices with a large dynamic range, or by using several seismic channels that have a smaller dynamic range, but which cover the entire required interval of operating frequencies. The paper analyzes recent studies and open publications, which indicate that the accurate determination of the power of underground nuclear explosions significantly depends on the magnitude of seismic sources from explosions, which in turn does not allow the use of effective algorithms for its assessment. To assess the magnitude of seismic sources from a nuclear explosion according to data from observation points of the Main Center for Special Control, calibration functions were refined for calculating the magnitude using vertical components of short-period P-waves, as a result of which the accuracy of assessing the power of underground nuclear explosions from the North Korean test site was increased. In practice, it was confirmed that the obtained estimates of the power of underground nuclear explosions correlate with the values calculated by the world's leading seismological services.

An element of scientific novelty is the refined calibration functions for calculating the magnitude from the bulk P wave for further obtaining reliable data on the power of nuclear explosions.

The practical significance of the article is the possibility of using the proposed scientific and methodological approaches to assessing the power of a nuclear explosion, the use of advanced seismic weapons based on the recording and analysis of seismic signals in the process of determining the parameters of seismic events from other regions, in particular, test sites, the development of proposals for automating information processing to reduce decision-making time, etc.

Conclusion and the perspectives of future researches. Further research will be aimed at improving scientific and methodological approaches to assessing the power of a nuclear explosion based on the registration and analysis of seismic signals and automation of information processing to reduce decision-making time, etc.

Keywords: nuclear explosion, nuclear explosion power, registration and analysis of signal parameters, magnitude, calibration function, camouflaged underground nuclear explosion, quality factor.

References

1. Kedrov, O. K., (2005). Seismic methods for monitoring nuclear tests. Moscow-Saransk: Publishing House of the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, pp. 20–22, 26, 27, 39–42, 244–246.
2. Bowers, D., Marshall, P.D. and Douglas, A., (2001). The level of deterrence provided by data from the SPITS seismometer array to possible violations of the Comprehensive Test Ban in the Novaya Zemlya region. *Geophysical Journal International*. 146, 425–438.
3. Chun, K. Y. and Henderson, G. A., (2009). Lg Attenuation near the North Korean Border with China, Part II: Model Development from the 2006 Nuclear Explosion in North Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 99(5), 3030–3038. DOI: 10.1785/0120080341.
4. Delbridge, B. G., Carmichael, J. D., Phillips, W. S., Cleveland, K. M., Begnaud, M. L. and Gammans, C. (2023). Source characterization of the declared North Korean nuclear tests from regional distance coda wave spectral ratios. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 128, 1–32.
5. Murphy, J. R., Kohl, B. C., Stevens, J. L., Bennett, T. J. and Israelsson, H. G., (2010). *Final Technical Report. Under*

- DOS Contract No. SAQMMA09C0250 (01 September 2009 – 31 August 2010). Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA628639.pdf> (Accessed: 10 January 2025).*
6. Sharov, N. V., Malovichko, A. A. and Shchukin, Y. K., (2007). *Earthquakes and microseismicity in modern geodynamics of the East European platform. Book 2: Microseismicity*. Petrozavodsk: Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, 19.
 7. Ringdal, F., Marshall, P. D. and Alewine, R. W., (1992). Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site. *Geophysical Journal International*, 109, 65–77.
 8. Bönnemann, C., Ceranna, L. and Hartmann, G., (2013). *The 2013 North Korean nuclear test*. Hannover (Germany): Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR).
 9. Zhao, L., Xie, X.-B., Wang, W. and Yao, Z.-X., (2012). Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 102, 467–478. DOI: 10.1785/0120110163.
 10. Zhang, M. and Wen, L. X., (2013). High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test. *Geophysical Research Letters*. 40, 2941–2946. DOI: 10.1002/grl.50607.

Рукопис надійшов до редакції 05.03.2025
 Рукопис прийнято до друку після рецензування 25.03.2025
 Дата публікації 30.04.2025