

**Л.В.Борковська¹, В.П.Кислий¹, В.О.Мороженко¹, Ю.Г.Серьожкін¹,
Є.О.Соловйов¹, В.М.Настич²**

АКУСТИЧНО-ОПТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ ПРИХОВАНИХ В ҐРУНТІ ОБ'ЄКТІВ

Тематика роботи відноситься до вирішення проблеми гуманітарного розмінування, яка з початком військової агресії росії проти України набула актуальності і для нашої країни. Дана робота є частиною циклу робіт із створення лазерно-акустичного комплексу пошуку небезбечних вибухових предметів на основі лазерного доплерівського віброметра, що був створений в Інституті фізики напівпровідників ім.В.Є.Лашкарьова НАН України. Її метою є дослідження вібрацій заглиблених об'єктів за різних умов для підвищення точності їх виявлення та ідентифікації. Увага була приділена дослідженню параметрів акустичних резонансів в ґрунтах із різною вологістю. Для досліджень були вибрані прості для аналізу об'єкти, що являли собою круглі порожнисті ємності, виготовлені з металу та пластику. Вони заглиблювались в річковий пісок таким чином, щоб поверхня піску була паралельна широкій стороні об'єкта. Глибина занурення становила 10–11 мм. Збудження акустичних вібрацій відбувалось білим шумом за допомогою гучномовця. Дослідження показали, що внаслідок зміни пружних параметрів ґрунту при зміні вологості, спектр коливань поверхні над заглибленим об'єктом змінюється. Резонансні лінії посуваються в область більших частот, при цьому їхня ширина збільшується. Це треба враховувати при пошуку та ідентифікації заглиблених об'єктів за допомогою лазерного доплерівського віброметра. Дослідження показали, що розроблений в ІФН ім.В.Є.Лашкарьова НАН України лазерний доплерівський віброметр може бути успішно застосований в гуманітарному розмінуванні, але він потребує внесення конструктивних змін для збільшення відношення сигнал/шум.

Ключові слова: виявлення підземних об'єктів, лазерний доплерівський віброметр, гуманітарне розмінування.

1. ВСТУП

Проблема виявлення заглиблених об'єктів є надзвичайно актуальною у багатьох сферах діяльності людини, таких як будівництво, екологічний моніторинг, археологічні та геологічні дослідження тощо [1]. Особливого значення ця проблема набуває в сфері виявлення заглиблених вибухонебезпечних предметів, зокрема, небезбечних вибухових предметів та нерозірваних боєприпасів для забезпечення безпеки цивільного населення та військовослужбовців. З початком військової агресії росії проти України проблема гуманітарного розмінування набула актуальності і для нашої країни. За офіційними даними [2], понад 30% території країни потенційно заміновано, що робить Україну однією з найбільш замінованих країн у світі. Це створює серйозні ризики для життя людей, обмежує доступ до сільськогосподарських земель та гальмує відновлення постраждалих регіонів. Незважаючи на значний прогрес у технологіях виявлення небезбечних вибухових предметів та інших заглиблених об'єктів [3], традиційні електромагнітні методи мають обмежену здатність виявляти неметалеві об'єкти, що є критичним, наприклад, при пошуку сучасних протипіхотних небезбечних вибухових предметів з пластиковим корпусом [4]. Підвищення чутливості металодетектора для виявлення меншої кількості металу робить його також дуже чутливим до металевих уламків, які часто знаходять у заражених небезбечними вибуховими предметами зонах [4]. Ці фактори зумовлюють необхідність розробки та застосування більш досконалих і універсальних методів неруйнівного контролю для надійного виявлення заглиблених об'єктів.

Застосування лазерного доплерівського віброметра (ЛДВ) є перспективним підходом для виявлення заглиблених об'єктів. Існуючі дослідження [5-8] демонструють можливість використання ЛДВ для виявлення заглиблених небезбечних вибухових предметів шляхом аналізу вібрацій, що виникають при акустичному або сейсмічному збудженні ґрунту.

© Л.В. Борковська, В.П. Кислий, В.О. Мороженко, Ю.Г. Серьожкін, Є.О. Соловйов, В.М. Настич, 2025

Застосування ЛДВ має ряд важливих переваг, особливо в контексті дослідження вібрацій заглиблених об'єктів. Однією з ключових переваг є безконтактний характер вимірювання, що дозволяє досліджувати вібрації ґрунту над заглибленими об'єктами, не порушуючи структури ґрунту та не впливаючи на характеристики вібрацій самого об'єкта. ЛДВ характеризується високою роздільною здатністю як за амплітудою, так і за частотою вібрацій, що є важливим для виявлення слабких вібраційних сигналів, які можуть виникати від заглиблених об'єктів. ЛДВ також може працювати на значній відстані від досліджуваного об'єкта, що забезпечує безпеку при роботі з потенційно небезпечними об'єктами.

В Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України було розроблено та створено ЛДВ, що був успішно застосований для виявлення прихованих в ґрунті предметів [10]. Дана робота є частиною циклу робіт із створення лазерно-акустичного комплексу на основі ЛДВ для гуманітарного розмінування. Її метою є дослідження вібрацій заглиблених об'єктів за різних умов для підвищення точності їх виявлення та ідентифікації. Увага була приділена дослідженню параметрів акустичних резонансів в ґрунтах із різною вологістю. Актуальність досліджень обумовлена тим, що властивості ґрунту, такі як вологість та щільність, можуть значно впливати на поширення акустичних та сейсмічних хвиль, а також на вібраційні характеристики заглиблених об'єктів.

2. МЕТОДИКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

Принцип роботи ЛДВ докладно описаний в [11,12]. В його основі лежить вимірювання швидкості та амплітуди зміщення віброуючої поверхні шляхом аналізу частотного зсуву (ефекту Доплера) відбитого лазерного променя. У цьому процесі лазерний промінь з відомою частотою спрямовується на досліджувану поверхню. Рух поверхні викликає зміну частоти відбитого світла, яка порівнюється із частотою опорного променя. В результаті гетеродинного детектування цих двох хвиль виділяється різницева частота, прямо пропорційна швидкості віброуючої поверхні. Ця частота дозволяє визначати як величину, так і напрямок вібрації. Вихідний сигнал з фотодетектора являє собою частотно-модульований (ЧМ) сигнал, де частота модуляції відповідає доплерівському зсуву, спричиненому віброуючою поверхнею. Цей ЧМ-сигнал демодулюється для отримання інформації про зміщення.

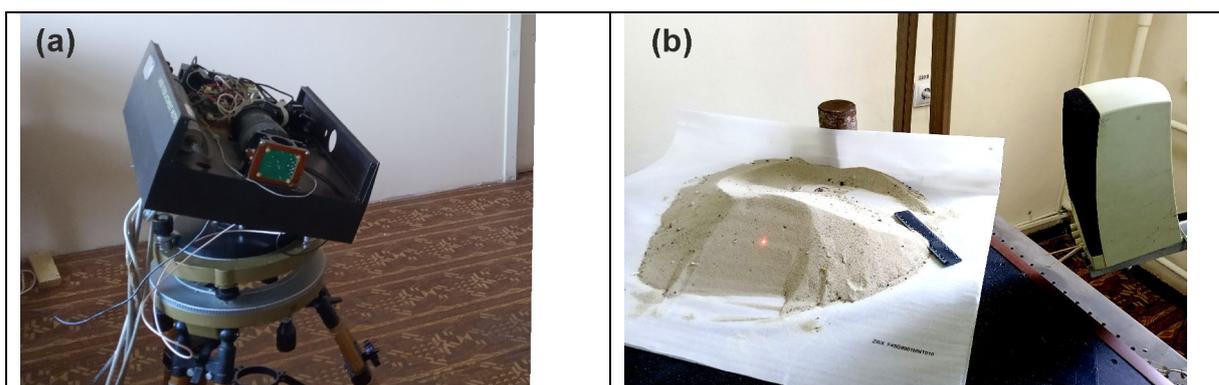


Рис. 1. Фото: а-закріплений на тринозі ЛДВ; б-масив піску.

На рис.1а показано фото закріпленого на тринозі ЛДВ, що застосовувався. Його конструкція була докладно описана в [10]. Для досліджень були вибрані прості для аналізу об'єкти, що являли собою круглі порожнисті ємності, виготовлені з металу та пластику діаметром 95 та 92 мм відповідно та товщиною 37 та 33 мм відповідно. Вони заглиблювались

в пісок (рис.1b) таким чином, щоб поверхня піску була паралельна широкій стороні об'єкта. Глибина занурення становила 10-11 мм. Збудження акустичних вібрацій відбувалось білим шумом за допомогою гучномовця (рис.1b). Гучність звуку на поверхні становила 92-94 dB. Лазерний промінь ЛДВ був спрямований на ґрунт в область епіцентру заглибленого об'єкта.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис.2. показано резонансні лінії акустичних коливань металевого та пластикового об'єктів в сухому та вологому піску. Спектри характеризуються високим рівнем шуму, тому для виділення та аналізу лінії коливань застосовувалась математична обробка даних, використовуючи лоренцівський профіль розподілу амплітуди (показані на рис.2 кривими 2).

Видно, що в сухому піску спектральне положення ліній коливань металевого та пластикового об'єктів складає відповідно 155 Гц та 202 Гц. У вологому піску лінії посуваються у високочастотну область і їхнє положення становить відповідно 245 Гц та 281 Гц. При цьому змінюється і ширина ліній. Якщо в сухому піску вона становила відповідно 48 Гц та 41 Гц, то в вологому піску-72 Гц для обох об'єктів. Втім, треба зауважити, що з огляду на зовнішній вигляд необроблених ліній у вологому піску можна припустити, що вони є подвійними і містять дві близько розташовані об'ємні моди коливань [9]. Цей факт потребує більш докладних подальших досліджень.

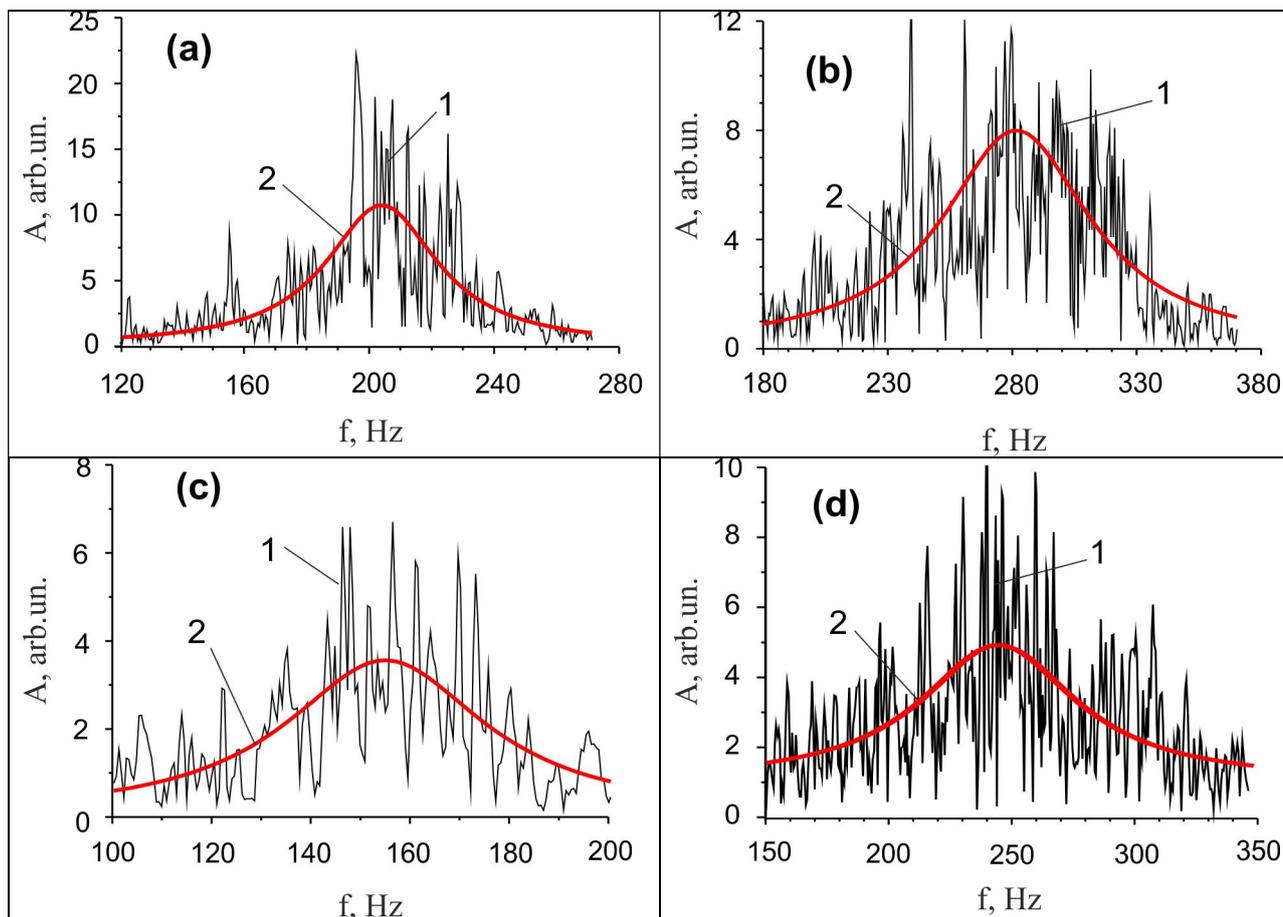


Рис. 2. Резонансні лінії акустичних коливань металевого та пластикового об'єктів в сухому та вологому піску: а-металевий об'єкт в сухому піску; б-металевий об'єкт у вологому піску; с-пластиковий об'єкт в сухому піску; д-пластиковий об'єкт у вологому піску. 1-експериментальні результати; 2-результати математичної обробки.

Зміна спектрів коливань пояснюється тим, що резонансна реакція заглибленого об'єкта на зовнішнє збудження залежить від взаємодії між об'єктом та навколишнім ґрунтом. При цьому спектральне положення та параметри резонансів обумовлюються не тільки розміром та пружними параметрами об'єкта, але і пружними параметрами ґрунту [9]. Сухий пісок характеризується модулем Юнга 10-26 МПа [13] та коефіцієнтом Пуассона 0.15-0.25 [14], в той час як для мокрого піску ці параметри становлять відповідно 34-69 МПа та 0.2-0.4 [13,14] (точні значення пружних параметрів визначаються експериментально для кожного конкретного випадку).

Таким чином, можна констатувати, що ґрунт діє як середовище, яке може демпфувати або змінювати резонансні частоти заглибленого об'єкта. Цей факт треба враховувати при пошуку та ідентифікації заглиблених об'єктів за допомогою ЛДВ.

4. ВИСНОВКИ

В роботі досліджено особливості резонансних ліній акустичних коливань прихованих в ґрунті об'єктів в залежності від вологості ґрунту. Дослідження показали, що внаслідок зміни пружних параметрів ґрунту при зміні вологості спектр коливань поверхні над заглибленим об'єктом змінюється. Резонансні лінії посуваються в область більших частот, при цьому їхня ширина збільшується. Це треба враховувати при пошуку та ідентифікації заглиблених об'єктів за допомогою ЛДВ.

Дослідження також підтвердили, що розроблений в ІФН ім.В.Є.Лашкарьова НАН України ЛДВ може бути успішно застосований в гуманітарному розмінуванні. Втім, очевидною є необхідність внесення конструктивних змін в ЛДВ для збільшення відношення сигнал/шум.

Подяка

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту № 2023.04/0088.

**L.V. Borkovska, V.P. Kyslyi, V.O. Morozhenko, Y.G. Seryozhkin,
E.A. Solovyov, V.M. Nastych**

ACOUSTO-OPTICAL INVESTIGATION OF RESONANT VIBRATION OF BURIED OBJECTS IN SOIL

The subject of the work relates to the solution of the problem of humanitarian demining, which, with the beginning of the Russian military aggression against Ukraine, has become relevant for our country. This work is part of a series of works on the creation of a laser-acoustic mine detection complex based on a laser Doppler vibrometer, which was created at the V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Its purpose is to study the vibrations of buried objects under various conditions to increase the accuracy of their detection and identification. Attention was paid to the study of the parameters of acoustic resonances in soils with different humidity. Simple for analysis objects were used for the research, which were round hollow containers made of metal and plastic. They were buried in river sand in such a way that the surface of the sand was parallel to the wide side of the object. The immersion depth was 10-11 mm. The excitation of soil surface vibrations was carried out by acoustic white noise in the frequency range of 50–1000 Hz using a loudspeaker. The sound volume on the surface was 92-94 dB. Acoustic vibrations penetrated the sand and generated seismic waves that interacted with the object. Studies have shown that the resonant response of the object depends on the interaction between the object and the environment. Sand acts as a medium that can damp or change the resonant frequencies of a buried object. It has been established that the change in the elastic parameters of the soil with a change in humidity changes the spectrum of surface vibrations above the buried object, shifting the resonant lines of surface vibrations to the region of higher frequencies. In this case, the width of the resonances increases. The studies shown that the laser Doppler vibrometer developed at the V.E. Lashkaryov Institute

of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine can be successfully used in humanitarian demining, but it requires design changes to increase the signal-to-noise ratio.

Keywords: detection of underground objects, laser Doppler vibrometer, humanitarian demining.

1. Alshamy H., Sadahb J. W., Saeed T. R. Different techniques in detection of buried objects using ground-penetrating radar. *Al-Qadisiyah J. Eng. Sci.* 2022. **14**, №2. P. 223-231. DOI:10.30772/qjes.v14i4.892.
2. Урядовий портал. <https://www.kmu.gov.ua/news/denys-shmyhal-rozminuvannia-ukrainy-tse-hlobalnyi-proekt-ta-investytsiia-u-bezpeku-ievropy>.
3. Барбашин В.В., Назаров О.О., Рютин В.В., Толкунов І.О. Основи організації піротехнічних робіт. Навчальний посібник. Під ред. В.П. Садкового. Харків: ВРВД УЦЗУ. 2010. 353 с.
4. Bello R. Literature Review on Landmines and Detection Methods. *Front. Sci.* 2013. **3**,№1. P. 27-42. DOI: 10.5923/j.fs.20130301.05
5. Aranchuk V., Aranchuk I., Carpenter B., Hickey C. Laser multibeam differential interferometric sensor for acoustic detection of buried objects. *Opt. Eng.* 2023. **62**,№2. P. 024103. <https://doi.org/10.1117/1.OE.62.2.024103>.
6. Libbe B., Perea J. Doppler-vibrometer landmine-detection system operated from a moving vehicle. *SPIE Proc. Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXIV*. 2019. **11012**. P. 110120W-1-110120W-8. <https://doi.org/10.1117/12.2519299>.
7. Rajesh K.R., Murali R., Mohanachandran R. Realisation of Ultrasonic Doppler Vibrometer array for Landmine Detection. *Proc. of IEEE International Ultrasonics Symposium*. Dresden, Germany. 07-10 October 2012. P. 1030-1027. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2012.0257>.
8. Sabatier J.M. Advances in Acoustic Landmine Detection. In *Battlefield Acoustic Sensing for ISR Applications. Meeting Proc. RTO-MP-SET-107*. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. 2006. P. 5-1 – 5-10.
9. Chi W., Yu-Qiu Z., Gao-Wei S., Wen-Wen W., Wei D. Numerical analysis of the resonance mechanism of the lumped parameter system model for acoustic mine detection. *Chinese Phys. B*. 2013. **22**. P. 124601. DOI: 10.1088/1674-1056/22/12/124601.
10. Borkovska L.V., Kyslyi V.P., Morozhenko V.O., Soloviev E.O., Serozkin Yu.G., Nastych V.M. Detection of buried mines and other explosive devices using a single-beam laser Doppler vibrometer. *SPQEO*. 2024. **27**, №4. P.472-477. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo27.04.472>.
11. Serozhkin Yu., Kollyukh O., Venger Y., et al. Detection of dust grains vibrations with a laserheterodyne receiver of scattered light. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2008. **109**,№8. P. 1517-1526. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.01.008>.
12. Laser Doppler Vibrometry: A Multimedia Guide to its Features and Usage. Edited by P. Tomasini, P. Castellini. *Springer*. 2020. ISBN-10:3662613174/ISBN-13:978-3662613177.
13. GeotechData, https://www.geotechdata.info/parameter/soil-young-s-modulus?utm_source=chatgpt.com.
14. Structx, https://structx.com/Soil_Properties_004.html?utm_source=chatgpt.com.

¹Інститут фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України,
41, проспект Науки, 03028 Київ, Україна
E-mail: morozh@meta.ua

Отримано: 21.05.2025

²Казенне підприємство спеціального
приладобудування «Арсенал», 8,
вул. Князів Острозьких, 02000 Київ, Україна