

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ «МОНІТОРИНГУ СТРУКТУРНОГО ЗДОРОВ'Я» ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ: ДАТЧИКИ, МЕТОДИ АНАЛІЗУ ДАНИХ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ В НАЦІОНАЛЬНОМУ ЗАПОВІДНИКУ «КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКА ЛАВРА»**OVERVIEW OF MODERN TECHNOLOGIES OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF HISTORICAL BUILDINGS: SENSORS, METHODS OF DATA ANALYSIS AND PROSPECTS OF APPLICATION IN THE NATIONAL RESERVE "KYIV-PECHERSK LAVRA"**

Д. О. Бугай¹, С. В. Щербина², Т. В. Криль¹, І. А. Черевко³, С. Б. Шехунова¹
Dmytro O. Bugai, Sergiy V. Scherbyna, Tetiana V. Kril, Iryna A. Cherevko, Stella B. Shekhunova

¹ Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601
(dmitri.bugay@gmail.com, kotkotmag@gmail.com, shekhun@gmail.com)

² S. I. Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, 32 Palladin Avenue, Kyiv, Ukraine, 03680
(nohup@ukr.net)

³ National Reserve "Kyiv-Pechersk Lavra", 9 Lavrska Str., Kyiv, Ukraine, 01015 (ira071165@yahoo.com)

Представлено короткий огляд сучасних технологій «моніторингу структурного здоров'я» (Structural Health Monitoring—SHM) будівельних конструкцій. Основну увагу приділено аналізу світового досвіду та особливостям застосування SHM до історичних пам'яток, які знаходяться в складних інженерно-геологічних умовах і зазнають впливів небезпечних геологічних процесів. Розглянуто цілі і принципи методу. Виконано огляд основних типів інструментальних датчиків (зокрема, акселерометрів, датчиків акустичної емісії, GPS-датчиків і датчиків умов навколишнього середовища). Розглянуто методи математичного аналізу й інтерпретації потоків отриманих даних. Показано актуальність застосування сучасних технологій SHM для архітектурних пам'яток Національного заповідника «Києво-Печерська лавра», які розташовані в складних інженерно-геологічних умовах і зазнають небезпечних впливів від природних (зсувні процеси, метеорологічні фактори) і техногенних факторів (перезволоження ґрунтів фундаментів внаслідок витоків із інженерних мереж, вібраційні навантаження від транспорту, вибухових хвиль внаслідок воєнних дій тощо). Обговорено пілотний досвід і перспективи застосування методології SHM до об'єктів Національного заповідника «Києво-Печерська лавра». Описано роботи з тестування датчиків (акселерометри, велосіметри, лазерний інклінометр) для реєстрації віброметричних, сейсмічних і деформаційних впливів на об'єкти Заповідника. Представлено метод автоматичного виділення корисного сигналу типу «мікротріщина» для акселерометричного датчика. Наведено результати тестової експлуатацію 3D лазерного інклінометра для дослідження напрямків сповзання і деформації історичних будівель споруд, зокрема, внаслідок зсувів і просядок ґрунту та ін.

Ключові слова: збереження пам'яток архітектури, інженерно-геологічні умови, тріщиноутворення, деформації споруд, динаміка споруд, акселерометри, GPS-пристрої.

A brief overview of modern technologies of "Structural Health Monitoring" (SHM) of building structures is presented. The main attention is paid to the analysis of the world experience and specifics of the application of SHM to historical buildings, which are situated in difficult geotechnical conditions and are exposed to the influence of dangerous geological processes. The goals and principles of the methodology are outlined. An overview of the main types of instrumental sensors (in particular, accelerometers, acoustic emission sensors, GPS sensors, and sensors of environmental conditions) is presented. The methods of mathematical analysis and interpretation of the received data streams are discussed. The article demonstrates the importance of employing contemporary SHM technologies for architectural monuments within the National Reserve "Kyiv-Pechersk Lavra". These structures are situated in challenging geotechnical and geological contexts, and are susceptible to hazardous impacts from both natural (landslide processes, meteorological factors) and anthropogenic (waterlogging of foundation soils due to leaks from engineering networks, vibration loads from transport, blast waves due to military operations, etc.) factors. The pilot experience of applying the SHM methodology to the objects of the Kyiv-Pechersk Lavra National Reserve is discussed. The work on testing of sensors

Цитування: Бугай Д. О., Щербина С. В., Криль Т. В., Черевко І. А., Шехунова С. Б. Огляд сучасних технологій «моніторингу структурного здоров'я» історичних будівель: датчики, методи аналізу даних і перспективи застосування в національному заповіднику «Києво-Печерська лавра». Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2023. Том 16, вип. 2. С. 76–86. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.293237>.

Citation: Bugai D. O., Scherbyna S. V., Kril T. V., Cherevko I. A., Shekhunova S. B., 2023. Overview of modern technologies of structural health monitoring of historical buildings: sensors, methods of data analysis and prospects of application in the National Reserve "Kyiv-Pechersk Lavra". Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine, Vol. 16., Iss. 2, Pp. 76–86. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.293237>.

(accelerometers, velocimeters, laser inclinometer) for recording vibrometric, seismic and deformation impacts on the objects of the reserve is described. A method of automatic extraction of a useful signal of the 'microcrack' type for an accelerometer sensor is presented. The results of the test operation of a 3D laser inclinometer for studying the directions of sliding and deformation of historical buildings and structures, in particular, due to landslides and soil subsidence, etc. are presented.

Keywords: preservation of architectural monuments, geotechnical and geological conditions, crack formation, building deformations, building dynamics, accelerometers, GPS devices.

ВСТУП

«Моніторинг здоров'я структури (будівлі, конструкції)» (SHM) — це процедура, що має на меті охарактеризувати стан будівельних конструкцій за допомогою оцінки деяких вимірюваних фізичних характеристик. За визначенням (Kolakowski, 2007), процес SHM передбачає спостереження за системою протягом певного часу, використовуючи періодичні вибірки вимірювань динамічної відповіді з масиву датчиків, виділення чутливих до пошкоджень характеристик із цих вимірювань і статистичний аналіз цих характеристик для визначення поточного стану «здоров'я системи». SHM для оцінки пошкоджень будівель, як правило, включає три етапи (Morino-Gomez et al., 2017): моніторинг сигналу, обробку сигналу та інтерпретацію отриманих даних (рис. 1, а).

Перший етап використовує широкий спектр датчиків для вимірювання фізичних властивостей будівельної конструкції, які можна класифікувати на три групи (Gatulli et al., 2017): кінематичні (переміщення, швидкість і прискорення), механічні (зусилля, деформації, напруги) і навколишнього середовища (вітер і температура). Також етап моніторингу сигналів потребує інструментарію для попередньої обробки («кондиціонування») сигналів

та системи збору даних для їхнього зберігання та подальшої обробки (рис. 1, б).

Системи SHM надають інформацію про будь-які значні зміни або пошкодження в структурі будівлі. Основною метою виявлення структурних пошкоджень є ідентифікація місця, типу та причин пошкодження, щоб оцінити серйозність пошкодження та спрогнозувати залишковий термін служби будівельної конструкції. Структурні вади, що можуть спричинити руйнування, можуть бути результатом внутрішніх факторів, таких як корозія, втома та старіння, і зовнішніх факторів, таких як землетруси, вітрові навантаження, ударні навантаження тощо. Шкода, заподіяна зазначеними факторами, може прогресувати дуже повільно і стати помітною лише при значному пошкодженні структури. Раннє виявлення структурних пошкоджень має важливе значення для гарантування безпеки конструкції протягом терміну її служби. Метою SHM є виявлення пошкоджень та оцінка на якісному і кількісному рівнях параметрів будівельної структури в експлуатації або під відповідними навантаженнями. Як свідчить світовий досвід, останні досягнення з розвитку «розумних датчиків», матеріалів і сенсорних технологій забезпечили потужні нові інструменти для

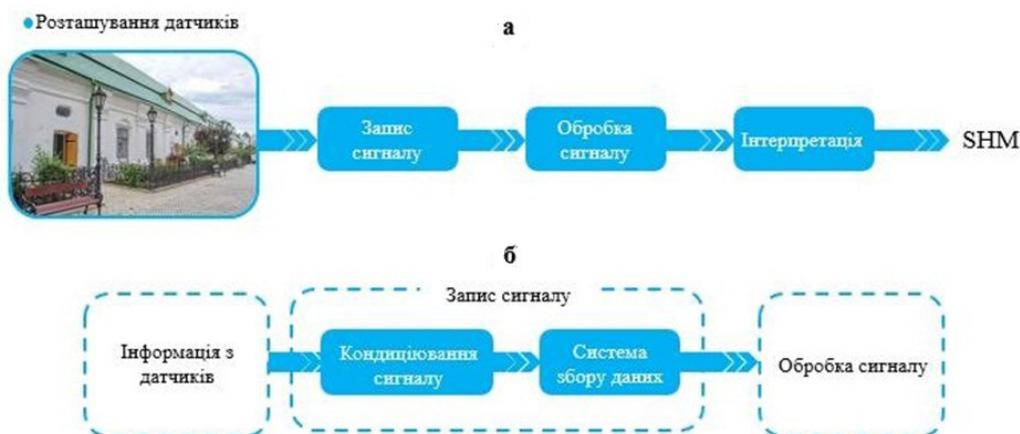


Рис. 1. Схема SHM: а — підхід на основі аналізу пошкоджень; б — кроки, необхідні на етапі отримання сигналу (Morino-Gomez et al., 2017).

Fig. 1. SHM concepts: а — approach based on damage analysis; б — steps required in the signal acquisition stage (Morino-Gomez et al., 2017).

вдосконалення будівельних систем (Sivasuriyan et al., 2021; López-Castro et al., 2022; Soleymani et al., 2023).

Питання моніторингу стану будівельних конструкцій є надзвичайно актуальним для архітектурних пам'яток Національного заповідника «Києво-Печерська лавра», які розташовані в складних інженерно-геологічних умовах і зазнають небезпечних впливів від природних (зсувні процеси, метеорологічні фактори) і техногенних факторів (перезволоження ґрунтів фундаментів внаслідок витоків із інженерних мереж, вібраційні навантаження від транспорту, вибухових хвиль унаслідок воєнних дій тощо) (Демчишин, Криль, 2019; Черевко та ін., 2022). Ця стаття має на меті представити огляд застосування сучасних технологій SHM до історичних будівель (включаючи основні типи датчиків, методи аналізу даних тощо) і висвітлити досвід пілотного використання автоматизованої системи моніторингу стану окремих споруд Заповідника, створеної в рамках проекту «Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій».

ЗАСТОСУВАННЯ SHM ДЛЯ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ

SHM широко використовується не лише для сучасних будівель, а й для історичних будівель з метою спостереження їхнього стану на основі застосування неруйнівних методів (NDT – Non Destruction Techniques) за поточним станом «здоров'я будівель» і прогнозування пошкоджень (Morino-Gomez et al., 2017; López-Castro et al., 2022; Soleymani et al., 2023). Так, у роботі (Zini et al., 2022) представлено використання безперервного моніторингу «здоров'я структур» (Continuous SHM – CSHM) на двох вежах і одній скульптурі середньовічної епохи в Італії. Дослідження демонструє математичний алгоритм, який застосовується для автоматизованого оперативного модального аналізу (A-OMA). Цей алгоритм є модальним трекером динамічних параметрів, таких як основні частоти, форми мод і модальне демпфування. Дослідження (Zonno et al., 2018) описує цікаве використання SHM на двох історичних спорудах: мурованій церкві в Португалії та глинобитній церкві в Перу. Це дослідження пропонує методологію автоматичної ідентифікації структурних модальних параметрів будівель (власні частоти, співвідношення зату-

хання та форми мод). Причому застосований процес складається з чотирьох етапів: збору даних, ідентифікації системи за допомогою методу SSI-даних (синхронно-послідовний інтерфейс), етапу очищення сигналу з критеріями та, нарешті, автоматичного аналізу за допомогою ієрархічної кластеризації. Результати показали точну оцінку модальних параметрів за допомогою лише кількох датчиків і важливий вплив середовища на динамічні властивості конструкції. Інші цікаві приклади застосування SHM до історичних будівель описані в (Lorenzoni et al., 2015; Saisi et al., 2015; Ubertini et al., 2017; Barsocchi et al., 2021; Kita et al., 2021; Soleymani et al., 2023 та ін.).

Основні типи датчиків, що використовуються в SHM

Акселерометри

До найбільш поширеного типу датчиків, які застосовуються в SHM, відносяться акселерометри (Morino-Gomez et al., 2017; Lopez-Castro et al., 2022). Акселерометр – це прилад, що вимірює осциляції руху структури за рахунок наявності наведених коливань, які викликають змінні прискорення в досліджуваній структурі. Загалом існує чотири типи акселерометрів, які використовуються в SHM: ємнісні, п'єзоелектричні, на основі вимірювання балансу сил і мікроелектромеханічні (MEMS) пристрої (Gattulliet al., 2016).

Зокрема, акселерометри застосовувалися до моніторингу історичних будівель (Lorenzoni et al., 2015; Saisi et al., 2015; Umbertini et al., 2017) для оцінки їх динамічних характеристик під впливом навколишнього середовища. В деяких з цих досліджень проводилася ідентифікація модальних параметрів будівель (власні частоти, співвідношення затухання та форми мод) для уточнення чисельних моделей будівель на основі методу скінченних елементів, а в інших здійснювалося виявлення пошкоджень після того, як сталися небезпечні явища природного характеру. У цих дослідженнях одним із висновків є те, що модальні параметри тісно пов'язані з умовами навколишнього середовища (в основному з температурою). Тому настійно рекомендується використовувати методи для розділення відповідних впливів, якщо зазначені характеристики використовуються для виявлення пошкодження.

Датчики акустичної емісії (АЕ-датчики)

За останні десятиліття значного розвитку набули інструментальні методи виявлення та кількісної оцінки тріщин. Одним з найбільш застосованих типів датчиків для виявлення тріщин є датчики акустичної емісії (АЕ-датчики) (Zárate et al., 2012; Carrasco et al., 2021). Коли твердий матеріал підпадає під вплив робочих умов, що перевищують його здатність до механічного опору, його внутрішня структура зазнає дислокацій і руйнувань, які вивільняють певну кількість енергії. Ця енергія, що поширюється у формі механічних хвиль у середовищі, відома як акустична емісія. Типове розташування сенсора для вимірювання АЕ передбачає розташування чутливого елемента в прямому контакті з поверхнею. Більшість датчиків АЕ засновані на п'єзоелектричному ефекті, який полягає у властивості деяких матеріалів генерувати напругу, коли вони піддаються механічному впливу. При застосуванні SHM у цивільному будівництві техніка АЕ набула широкого застосування завдяки здатності отримувати інформацію про наявність і розташування тріщин без впливу на нормальну експлуатацію споруди (Behnia et al., 2014). Приклади АЕ-сигналів від різних типів механічних впливів, включаючи утворення тріщин, наведено на рис. 2.

Методи ідентифікації тріщин на основі вимірів датчиків АЕ наведено в працях (Xu et al., 2016; Carrasco et al., 2020; Han et al., 2021). Застосування АЕ-методів до моніторингу стану історичних будівель описано в роботах (Carpinteri et al., 2007; Kilic et al., 2015; Xu et al., 2016;

Gopinath et al., 2021). Приклад отриманих із застосуванням сенсорів АЕ статистичних даних про утворення мікротріщин у штукатурці фрески каплиці Sacro Mounte de Varallo XVII–XVIII ст. в Італії подано на рис. 3.

GPS-датчики

Деякі застосування SHM потребують вимірювання переміщення для виявлення додаткових параметрів, які можуть бути задіяні для покращення алгоритму ідентифікації пошкоджень структур (будівель). У зв'язку з цим системи SHM можуть використовувати супутники глобального позиціонування (GPS) для вимірювання переміщення цивільної споруди. Відповідний принцип можна описати таким чином: після розташування GPS-приймача він з'єднується з чотирма супутниками, кожен з яких надсилає свою позицію. Оцінюючи час, який потребується, щоб сигнал, надісланий супутником, був отриманий приймачем, можна знайти його абсолютне положення, використовуючи основні схеми триангуляції. Варто зазначити, що для досягнення прийнятної чутливості для вимірювання переміщень необхідно використовувати високоточні приймачі (Morino-Gomez et al., 2017). У роботі (Im et al., 2013) представлено огляд застосування GPS у SHM. Було зроблено висновок, що GPS можна використовувати для вимірювання статичного або квазістатичного переміщення з достатньою точністю, що дозволяє виявити низькочастотні модальні параметри.

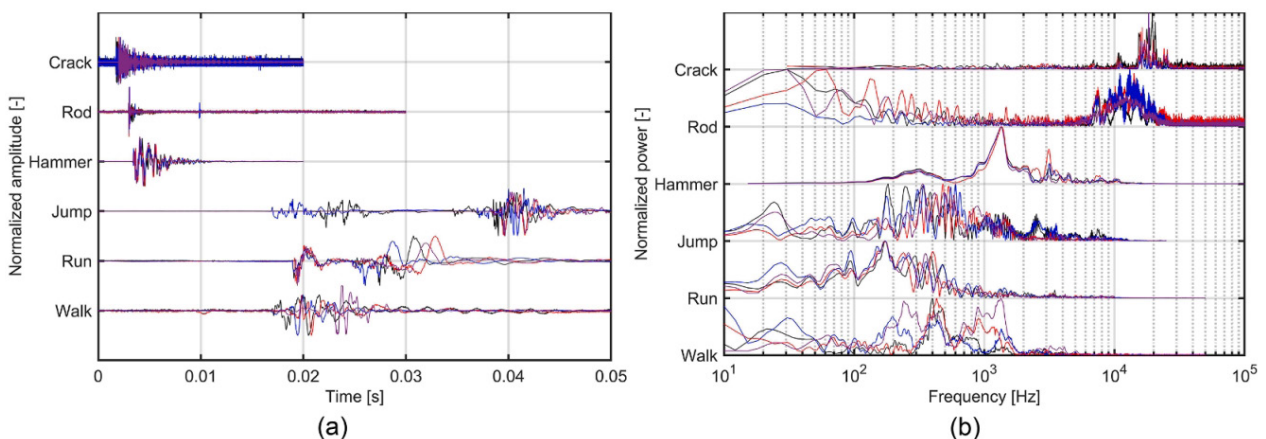


Рис. 2. Приклади АЕ-сигналів, зібраних у будівлі в часовій (а) та частотній (б) областях (Han et al., 2021).

Fig. 2. Examples of AE-signal collected in a building in time domain (a) and frequency domain (b) (Han et al., 2021).

Датчики параметрів навколишнього середовища

Вплив параметрів навколишнього середовища, таких як температура і швидкість вітру, відіграє важливу роль в оцінці фізичних властивостей в будівельних структурах (об'єктах), якою у більшості випадків не можна знехтувати. Наприклад, добре відомо, що підвищення температури призведе до збільшення в довжині матеріалу, у такий спосіб змінюючи жорсткість, а отже, значення модальних параметрів (Perez-Ramirez et al., 2016). Крім того, вимірювання швидкості вітру дуже важливе у SHM-застосуваннях, оскільки вітер може бути джерелом надмірної сили, яка потенційно може створити зони з більшими концентраціями напруги, ніж передбачено проєктом будівлі (структури). Тому постійний моніторинг цих змінних навколишнього середовища може надати кращий алгоритм для оцінки механічних властивостей досліджуваної структури.

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ

При дослідженнях із збереження та консервації історичних споруд в останні роки широко застосовуються методології, що поєднують моніторинг з відповідними математичними та чисельними моделями споруд (Soleymani et al., 2023). При цьому для прогнозування реакції структур на зовнішні навантаження, оцінки динамічних структурних властивостей найчастіше застосовуються чисельні моделі на основі методу кінцевих елементів (МКЕ). У той час як діагностика пошкоджень насамперед використовує дані моніторингу, локалізація пошкоджень часто потребує розробки та калібрування МКЕ-моделі конструкції, щоб узгодити спостережні модальні властивості зі змінами, пов'язаними з механічними пошкодженнями структури (Venzani et al., 2020). Відкалібровані на основі даних моніторингу МКЕ-моделі та їхні аналітичні результати також можуть бути використані для обґрунтування методів зміцнення і відновлення пошкоджених будівельних конструкцій.

Останнім часом значні перспективи для застосування SHM у цивільному будівництві також продемонстрували методи штучного інтелекту (ШІ) та алгоритми машинного навчання (МН). Вони здебільшого використовуються для аналізу даних неруйнівних випробувань (NDT), лабораторних випробувань, даних датчиків, даних моделювання МКЕ і зображень, отриманих під час огляду архітектурних пам'яток. Методи МН все частіше

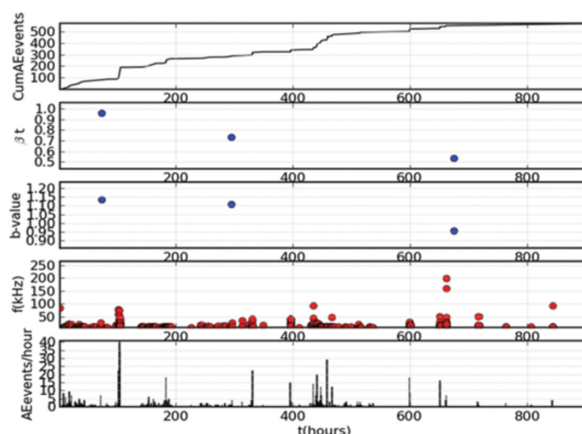


Рис. 3. Приклад результатів моніторингу за допомогою датчиків АЕ утворення мікротріщин у штукатурці фрески каплиці Sacro Mounte de Varallo XVII–XVIII ст. (Xu et al., 2016).

Fig. 3. An example of the monitoring results with acoustic emission sensors of micro-cracks formation in the plaster of the frescoes of the Sacro Mounte de Varallo chapels of the 17th-18th centuries (Xu et al., 2016).

застосовуються також для виявлення пошкоджень будівель історичної спадщини. Вони, зокрема, включають визначення міцносних характеристик кладки (як цегли, так і каменю), методи на основі зменшення жорсткості, методи оцінки сейсмічної вразливості, методи поверхневої діагностики на основі комп'ютерного зору, обробку зображень для ідентифікації пошкоджень і т. ін. Методи МН можуть бути корисними, якщо відбір зразків є неможливим, особливо для «старіючих» будівельних матеріалів. У цих випадках дані NDT-тестування і дані аналізу зображень на основі МН можуть бути використані для оцінки і прогнозування стану історичних будівель (Fiorucci et al., 2020; Mishra, 2021).

ПІЛОТНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ SHM НА ОБ'ЄКТАХ НАЦІОНАЛЬНОГО ЗАПОВІДНИКА «КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКА ЛАВРА»

З серпня по грудень 2023 р. у рамках проєкту «Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій» проведено роботи з тестування датчиків (акселерометри, велосіметри, лазерний інклінометр) для реєстрації віброметричних, сейсмічних і деформаційних впливів

на об'єкти Національного заповідника «Києво-Печерська лавра», а також здійснено тестову експлуатацію автоматизованої системи збору й аналізу даних. Відповідні зразки обладнання були надані для випробувань виконавцям проєкту від виробника обладнання ТОВ «РОДЕН» за запитом Інституту геологічних наук НАН України. В ході зазначеного тестування експериментальні зразки пристроїв були встановлені в корпусах № 3, 4 та Успенському соборі (рис. 4). Зазначені споруди були вибрані як об'єкти досліджень, оскільки для них спостерігаються процеси тріщиноутворення, які створюють загрозу безпечному стану будівельних конструкцій.

Акселерометри й акустичні датчики були застосовані для реєстрації утворення мікротріщин у будівельних конструкціях. У дослідженнях використані п'єзоелектричні акселерометри моделі 66332 AP21 виробництва ТОВ «РОДЕН». Зазначені датчики дозволяють проводити вимірювання прискорення мікросейсмічних коливань як конструктивних елементів будівель і споруд, так і поверхні ґрунту, зокрема фіксувати утворення мікротріщин. Розроблене програмне забезпечення дозволяє візуалізувати й аналізувати дані вимірювань, ідентифікувати зареєстровані геофізичні сигнали, визначати статистичні і просторові характеристики

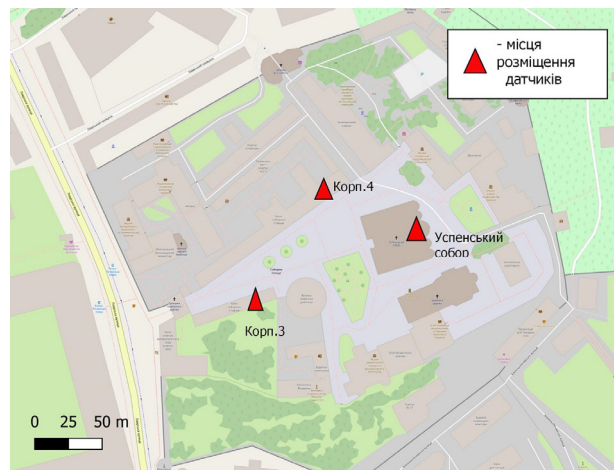


Рис. 4. Схема розміщення датчиків і обладнання в історичних будівлях Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» (станом на листопад 2023 р.).

Fig. 4. Scheme of placement of sensors and equipment in historical buildings of the National Reserve “Kyiv-Pechersk Lavra” (as of November 2023).

мікросейсмічної активності в зоні моніторингу. Інформацію про основні технічні характеристики акселерометрів наведено в таблиці.

Таблиця. Основні технічні характеристики п'єзоелектричних акселерометрів 66332 AP21 виробництва ТОВ «РОДЕН»

Table. Main technical characteristics of piezoelectric accelerometers 66332 AP21 manufactured by RODEN

Характеристика	Значення
Чутливість ($\pm 20\%$)	1000 мВ/г
Вимірюваний діапазон	± 5 г
Частотний діапазон (± 3 дБ%)	0,13–8000 Гц
Резонансна частота	> 20 кГц
Роздільність	0,0003 г рк
Постійна часу розряду	$\geq 1,2$ с
Час налаштування	10 с
Поперечна чутливість	$\leq 5\%$
Нелінійність	$\leq 1\%$
Температурний коефіцієнт	0,18 %/°C
Межа навантажень (ударна)	6000 г
Максимальне значення вимірюваного прискорення	123 м/с ²

Розглянемо метод автоматичного виділення корисного сигналу («автопікера») типу «мікротріщина» для акселерометричного датчика. Дослідження з проведенням технічних випробувань різних варіантів автопікерів показало, що найбільш ефективним методом автоматичного виділення корисного сигналу типу «мікротріщина» є метод AIC (Akaike information criterion) (Liu et al., 2018). Проведені дослідження з випробування цього підходу на потоках даних з тріщинами від 24 бітних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) з двома каналами — акселерометра 66332 AP21 і мікрофона — у корпусі № 3 Києво-Печерської лаври показало, що метод AIC є більш ефективним, ніж класичний LTA/STA (Long Time Amplitude / Short Time Amplitude method) метод (рис. 5).

Метод автоматизованого збору даних про утворення тріщин та їхні характеристики для наступного статистичного аналізу побудовано на основі використання спеціальної бази даних MySQL. За її допомогою можна вибирати різні типи тріщин за амплітудою, за часом вступу, будувати гістограми їхніх значень за різними інтервалами часу, за мінімальним і максимальним значеннями їхніх амплітуд, за відношенням інтервалів їхніх часових інтервалів до їхніх максимальних або мінімальних амплітуд тощо. Приклад розміщення акселерометричного й акустичного датчиків на стіні Успенського собору наведено на рис. 6, а.

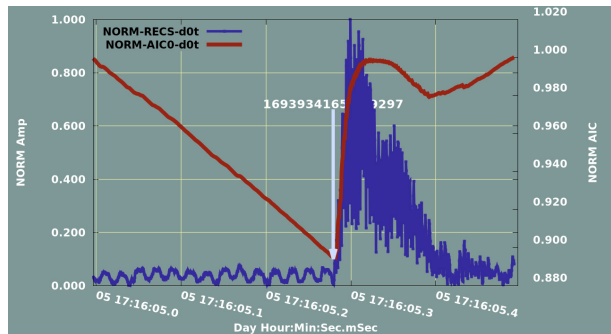


Рис. 5. Приклад використання автопікера AIC для виділення часу утворення мікротріщин у корпусі № 3 Києво-Печерської лаври.

Fig. 5. An example of using the AIC autopicker to find the time of microcracks formation in the Kyiv-Pechersk Lavra building No. 3.

За результатами проведеного тестування акселерометрів і акустичних датчиків у корпусі № 3 у серпні–листопаді 2023 р. було зафіксовано понад 1100 акустичних і механічних сигналів від утворення мікротріщин (рис. 7).

Для дослідження напрямків сповзання і деформації історичних будівельних споруд Києво-Печерської лаври (наприклад, унаслідок зсувів і просадок ґрунту) проведено тестову експлуатацію 3D лазерного інклінометра, який було встановлено у корпусі № 3. В систему збору даних також



Рис. 6. Фото зразків використаного обладнання: а — акселерометр 66332 AP21 та мікрофон на стіні Успенського собору; б — стандартний сейсмологічний комплект (у корпусі № 3).

Fig. 6. Photos of examples of the equipment used: а — accelerometer 66332 AR21 and a microphone on the wall of the Cathedral of the Assumption; б — standard seismological equipment (in building No. 3).

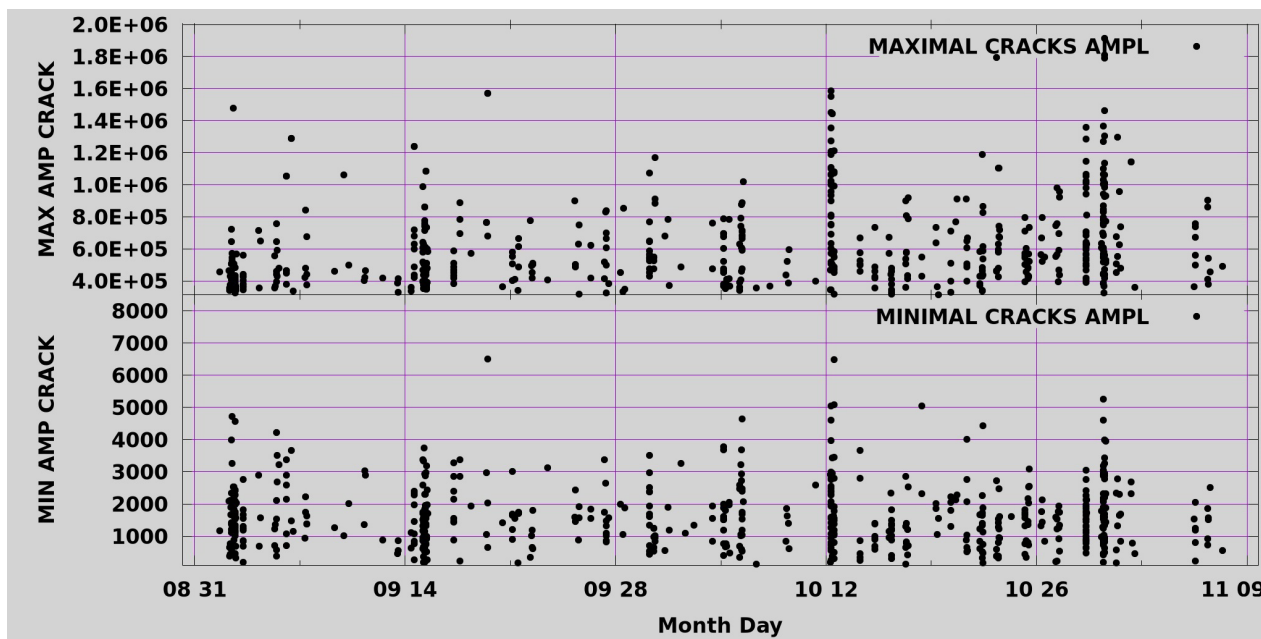


Рис. 7. Приклад графіку кількості мікротріщин у корпусі № 4 та їхні мінімальні (внизу) і максимальні (зверху) амплітуди за період досліджень серпень–листопад 2023 р.

Fig. 7. An example of a graph of the number of microcracks in case No. 4 and their minimum (bottom) and maximum (top) amplitudes for the period of research from August to November 2023.

було інтегровано і протестовано стандартний сейсмологічний комплект (велосіметр) для фіксації зовнішніх подій, які можуть вплинути на об'єкти Заповідника (вибухові хвилі від обстрілів і роботи ППО, віброметричні навантаження внаслідок руху на прилеглий території важкого транспорту тощо) (рис. 6, б). У систему автоматизованого моніторингу Києво-Печерської лаври також було інтегровано датчики температури і тиску повітря, що відслідковують зовнішні природні параметри.

Для перетворення аналогових сигналів з різних пристроїв проєкту (акселерометри, лазерного інклінометра та ін.) у цифрову форму використовуються спеціальні 24 бітних перетворювачі ADC (рис. 8). Цей АЦП має спеціальний годинник реального часу, який пов'язаний з міжнародною системою часу GPS для синхронізації загальної власної цифрової частини з міжнародним часом GMT+0. Така загальна синхронізація часу для всіх датчиків-вимірювачів дозволяє знаходити зв'язки між різними явищами на території Києво-Печерської лаври. В якості реєстратора сигналів, засобу керування системою і візуалізації отриманих даних використовується ноутбук з мобільним зв'язком «КИЇВСТАР».

Повномасштабна імплементація й експлуатація розробленої системи моніторингу архітектурних об'єктів Заповідника на наступних фазах досліджень (протягом 2024 р. і в подальший

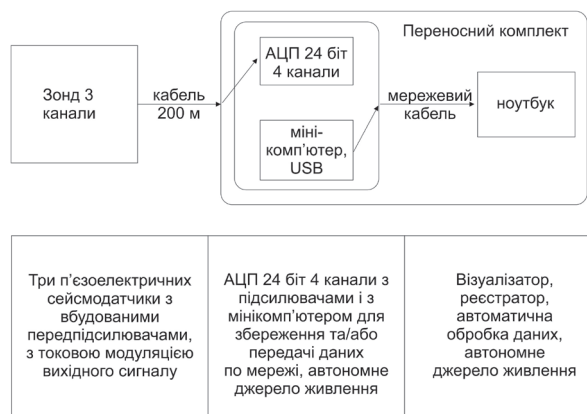


Рис. 8. Загальна схема використання 24 бітних АЦП із спеціальною системою первинної обробки і передачі даних на центральний сервер через мобільний зв'язок «КИЇВСТАР»

Fig. 8. The general scheme of using a 24-bit ADC with a special system of primary processing and data transmission to the central server via KYIVSTAR mobile communications

період) має на меті відслідковувати впливи природних, техногенних факторів і бойових дій (ракетні обстріли, атаки БПЛА) на процеси утворення мікротріщин, на деформації ґрунтових основ і будівельних конструкцій досліджуваних об'єктів Заповідника.

ВИСНОВКИ

Наведений короткий огляд показує, що SHM — методологія з використанням датчиків стану споруд, систем збору даних і математичних моделей досліджуваних об'єктів — набули значного розвитку за останнє десятиліття і перетворилися на важливі апробовані інструменти для моніторингу, оцінки і прогнозування технічного стану історичних будівель. Розбудова і застосування подібних автоматизованих систем збору й аналізу даних для архітектурних пам'яток Києво-Печерської лаври, які потерпають від небезпечних інженерно-геологічних процесів, відповідає сучасному світовому рівню досліджень і є актуальним завданням.

Пілотна експлуатація елементів автоматизованої системи із використанням акселерометрів, акустичних датчиків та інших апаратно-програмних засобів, створеної в 2023 р. у рамках проєкта НФДУ 2022.01/0209 «Комплексне дослідження геоекологічного стану збереженості об'єктів

історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах бойових дій» показала її роботоспроможність і ефективність для фіксації мікротріщин і деформаційних впливів у пам'ятках Заповідника, що знаходяться в складних інженерно-геологічних умовах.

Експлуатація описаної вище комплексної системи інструментального «моніторингу структурного здоров'я» об'єктів Заповідника і застосування методів математичного аналізу отриманих потоків даних дозволить в перспективі відслідковувати впливи (наприклад, накопичення мікротріщин) і пошкодження (наприклад, на основі змін параметрів спектральної моделі будівельної конструкції), які потенційно не можуть бути надійно виявлені виключно візуальними обстеженнями, а також дасть змогу встановити зв'язок стану історичних будівель із зовнішніми природними, техногенними чинниками і бойовими впливами.

Підготовку статті підтримано за рахунок гранту НФДУ 2022.01/0209 «Комплексне дослідження геоекологічного стану збереженості об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах бойових дій» (Конкурс НФДУ «Наука для відновлення України у воєнний та повоєнний період»).

REFERENCES

Demchyshyn M. G., Kril T. V., 2019. Improvement of the Engineering Protection Systems of the Kyiv-Pechersk Lavra Reserve Territory. *Nauka innov.* No 15(3), Pp. 37–51. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.15407/scin15.03.037>

Cherevko I., Zatserkovnyi V., Trofymenko P. et al., 2022. Application of the geodatabase of regime of hydrogeological conditions of the Kyiv Cave Monastery and its analysis. *Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Geology*, No 3(98). Pp. 92–103. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12>

Barsocchi P., Bartoli G., Betti M., et al., 2021. Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers. *Int. J. Archit. Herit.* No 15, Pp. 22–44. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1719229>

Behnia A., Chai H. K., Shiotani T. 2014: Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Constr. Build. Mater.* No 65, Pp. 282–302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.103>

Carpinteri A., Invernizzi S., Lacidogna G. 2007. Structural assessment of an XVIIth century masonry vault with AE and numerical techniques. *Int. J. Architect. Heritage.* No 2, Pp. 214–226.

Демчишин М. Г., Кріль Т. В. Вдосконалення інженерного захисту територій заповідника «Києво-Печерська лавра». *Nauka innov.*, 2019. 15(3), 37–51 <https://doi.org/10.15407/scin15.03.037>

Черевко І., Зацерковний В., Трофименко П., і ін. Застосування бази геоданих режимних спостережень за гідрогеологічними умовами території Києво-Печерської лаври та її аналіз. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2022. 3, 98, 92–103. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12>

Barsocchi P., Bartoli G., Betti M., et al. Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers. *Int. J. Archit. Herit.* 2021. 15, 22–44. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1719229>

Behnia A., Chai H. K., Shiotani T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Constr. Build. Mater.* 2014. 65, 282–302 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.103>

Carpinteri A., Invernizzi S., Lacidogna G. Structural assessment of an XVIIth century masonry vault with AE and numerical techniques. *Int. J. Architect. Heritage.* 2007. 2, 214–226.

Carrasco Á., Méndez F., Leaman F. et al., 2021. Short Review of the Use of Acoustic Emissions for Detection and Monitoring of Cracks. *Acoust. Aust.* No 49, Pp. 273–280. <https://doi.org/10.1007/s40857-021-00219-4>

Fiorucci M., Khoroshiltseva Ma., Pontil M., et al., 2020. Machine Learning for Cultural Heritage: A Survey. *Pattern Recognition Letters.* No 133, Pp. 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.02.017>

Gattulli V., Lepidi M., Potenza F., 2016. Dynamic testing and health monitoring of historic and modern civil structures in Italy. *Struct. Monit. Maint.* No 3, Pp. 71–90. <https://doi.org/10.12989/smm201631071>

Gopinath V. K., Ramadoss R., 2021. Review on structural health monitoring for restoration of heritage buildings, *Materials Today: Proceedings.* No 43(2), 2021, Pp. 1534–1538. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.318>

Han G., Y.-M. Kim, H. Kim, T.-M. Oh, K.-I. Song, A. Kim, Y. Kim, Y. Cho, T.-H. Kwon, 2021. Auto-detection of acoustic emission signals from cracking of concrete structures using convolutional neural networks: Upscaling from specimen, *Expert Systems with Applications*, 186, 115863. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115863>

Im S. B., Hurlbaeus S., Kang Y. J., 2013. Summary review of GPS technology for structural health monitoring. *J. Struct. Eng.* No 139, Pp. 1653–1664. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST1943-541X0000475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST1943-541X0000475)

Kilic G. 2015. Using advanced NDT for historic buildings: Towards an integrated multidisciplinary health assessment strategy. *J. Cult. Herit.* 16, Pp. 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.010>

Kita A., Cavalagli N., Venanzi I., Ubertini, F., 2021. A new method for earthquake-induced damage identification in historic masonry towers combining OMA and IDA. *Bull. Earthq. Eng.* No 19, Pp. 5307–5337. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01167-0>

Kořakowski P., 2007. Structural health monitoring – A review with the emphasis on low-frequency methods. *Engng. Trans.* No 55 (3), Pp. 239–275. <https://doi.org/10.24423/engtrans.220.2007>

Liu Q., Liu Qi, Pan Y., et al., 2018. Microcracking Mechanism Analysis of Rock Failure in Diametral Compression Tests. *J. Mater. Civ. Eng.,* No 30(6), 04018082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002251](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002251)

López-Castro B., Haro-Baez A.G., Arcos-Aviles D., et al., 2022. A Systematic Review of Structural Health Monitoring Systems to Strengthen Post-Earthquake Assessment Procedures. *Sensors.* 22, 9206. <https://doi.org/10.3390/s22239206>

Lorenzoni, F., Casarin, F., Modena, C. et al., 2013. Structural health monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy. *J. Civil. Struct. Health Monit.* No 3, Pp. 227–246. <https://doi.org/10.1007/s13349-013-0065-0>

Mishra M., 2021. Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of-the-art review and case studies. *J. Cult. Heritage*, No 47, Pp. 227–245. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.005>

Moreno-Gomez A., Perez-Ramirez C.A., Dominguez-Gonzalez A. et al., 2018. Sensors Used in Structural Health Monitoring.

Carrasco Á., Méndez F., Leaman F. et al. Short Review of the Use of Acoustic Emissions for Detection and Monitoring of Cracks. *Acoust. Aust.* 2021. 49, 273–280 <https://doi.org/10.1007/s40857-021-00219-4>

Fiorucci M., Khoroshiltseva Ma., Pontil M., et al. Machine Learning for Cultural Heritage: A Survey. *Pattern Recognition Letters.* 2020. 133, 102–108, <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.02.017>

Gattulli V., Lepidi M., Potenza F. Dynamic testing and health monitoring of historic and modern civil structures in Italy. *Struct. Monit. Maint.* 2016. 3:71–90. <https://doi.org/10.12989/smm201631071>

Gopinath V. K., Ramadoss R. Review on structural health monitoring for restoration of heritage buildings, *Materials Today: Proceedings*, 2021. 43(2), 2021, 534–1538, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.318>

Han G., Y.-M. Kim, H. Kim, T.-M. Oh, K.-I. Song, A. Kim, Y. Kim, Y. Cho, T.-H. Kwon, Auto-detection of acoustic emission signals from cracking of concrete structures using convolutional neural networks: Upscaling from specimen, *Expert Systems with Applications*, 2021. 186, 115863. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115863>

Im S. B., Hurlbaeus S., Kang Y. J. Summary review of GPS technology for structural health monitoring. *J. Struct. Eng.* 2013.139, 1653–1664. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST1943-541X0000475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST1943-541X0000475)

Kilic G. 2015. Using advanced NDT for historic buildings: Towards an integrated multidisciplinary health assessment strategy. *J. Cult. Herit.* 16, 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.010>

Kita A., Cavalagli N., Venanzi I., Ubertini, F. A new method for earthquake-induced damage identification in historic masonry towers combining OMA and IDA. *Bull. Earthq. Eng.* 2021. 19, 5307–5337. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01167-0>

Kořakowski P. Structural health monitoring – A review with the emphasis on low-frequency methods. *Engng. Trans.* 2007. 55, 3, 239–275. <https://doi.org/10.24423/engtrans.220.2007>

Liu Q., Liu Qi, Pan Y., et al. Microcracking Mechanism Analysis of Rock Failure in Diametral Compression Tests. *J. Mater. Civ. Eng.,* 2018. 30(6), 04018082 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002251](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002251)

López-Castro B., Haro-Baez A.G., Arcos-Aviles D., et al. A Systematic Review of Structural Health Monitoring Systems to Strengthen Post-Earthquake Assessment Procedures. *Sensors.* 2022. 22, 9206. <https://doi.org/10.3390/s22239206>

Lorenzoni, F., Casarin, F., Modena, C. et al. Structural health monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy. *J. Civil. Struct. Health Monit.* 2013. 3, 227–246. <https://doi.org/10.1007/s13349-013-0065-0>

Mishra M. Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of-the-art review and case studies. *J. Cult. Heritage*, 2021. 47, 227–245, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.005>

Moreno-Gomez A., Perez-Ramirez C.A., Dominguez-Gonzalez A. et al. Sensors Used in Structural Health Monitoring. *Arch*

- Arch Computat Methods Eng.* No 25, Pp. 901–918. <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9217-4>
- Saisi A., Gentile C., Guidobaldi M. 2015. Post-earthquake continuous dynamic monitoring of the Gabbia Tower in Mantua, Italy. *Constr. Build. Mater.* No 81, Pp.101–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.201502010>
- Sivasuriyan A., Vijayan D. S.; Górski W., et al., 2021. Implementation of Structural Health Monitoring in Multi-Story Buildings. *Buildings.* No 11, 263 p. <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>
- Soleymani A., Jahangir H., Nehdi M. L., 2023. Damage detection and monitoring in heritage masonry structures: Systematic review, *Constr. Build. Materials.* No 397, 132402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132402>
- Ubertini F., Comanducci G., Cavalagli N. et al., 2017. Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment. *Mech. Syst Signal Process.* No 82, Pp. 307–322. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.201605025>
- Venanzi I., Kita A., Cavalagli N., et al., 2020. Earthquake-induced damage localization in a historic masonry tower through long-term dynamic monitoring and FE model calibration. *Bull. Earthquake Eng.* No 18, Pp. 2247–2274. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00780-4>
- Xu J., Han Q., Xu Y., 2016. Application of Acoustic Emission Technique in the Monitoring of Masonry Structures. Non-Destructive Testing. In book: Non-destructive testing. <http://dx.doi.org/10.5772/63093>
- Zárate B., Caicedo J., Yu J, Ziehl P., 2012. Probabilistic prognosis of fatigue crack growth using acoustic emission data. *J. Eng. Mech.* No 138, Pp. 1101–1111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM1943-78890000414](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM1943-78890000414)
- Zini G.; Betti M.; Bartoli G., 2022. A pilot project for the long-term structural health monitoring of historic city gates. *J. Civ. Struct. Health Monit.* No 12, Pp. 537–556. <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00563-7>
- Zonno G., Aguilar R.; Boroschek R., Lourenço P. B., 2018. Automated long-term dynamic monitoring using hierarchical clustering and adaptive modal tracking: Validation and applications. *J. Civ. Struct. Health Monit.* No 8. Pp. 791–808. <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0306-3>
- Computat Methods Eng.*, 2018. 25, 901–918 <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9217-4>
- Saisi A., Gentile C., Guidobaldi M. Post-earthquake continuous dynamic monitoring of the Gabbia Tower in Mantua, Italy. *Constr. Build. Mater.* 2015. 81,101–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.201502010>
- Sivasuriyan A., Vijayan D. S.; Górski W., et al. Implementation of Structural Health Monitoring in Multi-Story Buildings. *Buildings.* 2021. 11, 263. <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>
- Soleymani A., Jahangir H., Nehdi M. L. Damage detection and monitoring in heritage masonry structures: Systematic review, *Constr. Build. Materials.* 2023. 397, 132402, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132402>
- Ubertini F., Comanducci G., Cavalagli N. et al. Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment. *Mech. Syst Signal Process.* 2017. 82, 307–322. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.201605025>
- Venanzi I., Kita A., Cavalagli N., et al. Earthquake-induced damage localization in a historic masonry tower through long-term dynamic monitoring and FE model calibration. *Bull. Earthquake Eng.* 2020. 18, 2247–2274. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00780-4>
- Xu J., Han Q., Xu Y. 2016. Application of Acoustic Emission Technique in the Monitoring of Masonry Structures. Non-Destructive Testing. In book: Non-destructive testing. <http://dx.doi.org/10.5772/63093>
- Zárate B., Caicedo J., Yu J, Ziehl P. Probabilistic prognosis of fatigue crack growth using acoustic emission data. *J. Eng. Mech.* 2012. 138, 1101–1111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM1943-78890000414](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM1943-78890000414)
- Zini G.; Betti M.; Bartoli G. A pilot project for the long-term structural health monitoring of historic city gates. *J. Civ. Struct. Health Monit.* 2022. 12, 537–556. <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00563-7>
- Zonno G., Aguilar R.; Boroschek R., Lourenço P. B. Automated long-term dynamic monitoring using hierarchical clustering and adaptive modal tracking: Validation and applications. *J. Civ. Struct. Health Monit.* 2018. 8, 791–808 <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0306-3>

Manuscript received November 30, 2023;
revision accepted December 20, 2023.

¹Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна

²Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,
Київ, Україна

³Національний заповідник «Києво-Печерська лавра»,
Київ, Україна