

UDC 624.15:699.841

**Yurii Ischenko**<sup>1</sup>, PhD student, Head of the Department  
ORCID ID 0000-0001-6046-8180, *e-mail*: ischenko@ndibk.gov.ua

**Andrii Vusatiuk**<sup>2</sup>, PhD, researcher  
ORCID ID 0000-0002-3096-3188, *e-mail*: avusatiuk@gmail.com

<sup>1</sup> State Enterprise “SE Research Institute of Building Constructions”, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Digital Production LLC, Kyiv, Ukraine

## TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC INFLUENCES ON GEOTECHNICAL STRUCTURES IN CONDITIONS OF COMPACTED URBAN BUILDINGS ON THE EXAMPLE OF KYIV

**Abstract.** *The applied technique of taking into account the dynamic effects on geotechnical structures in the conditions of compacted urban development with direct dynamic calculations taking into account the experimentally obtained accelerograms has been further developed. The methodology includes: visual and vibrodynamic inspection of the new building of the geotechnical structure and existing sources of vibrodynamic influences (taking into account the natural seismic background – seismic zoning of the construction site); construction of a calculation model; performing direct dynamic calculations of anti-landslide structures (pit walls, stress-strain state of the surrounding construction site soil, superstructure, etc.) taking into account the actual experimentally obtained accelerograms for the studied geotechnical structure (superstructure, etc.); analysis of compliance of the received settlement and design data of the new building with the current normative documents on seismic construction; if necessary – issuance of recommendations for strengthening the relevant building structures of the foundation and (or) superstructure. Determination of dynamic characteristics of soil and building structures is based on their free oscillations of small amplitude, which are disturbed by natural or man-made microseisms, includes: registration of oscillations using highly sensitive (in our case – seismic) sensors; calculation and analysis of Fourier spectra in order to isolate resonant peaks corresponding to different forms of free oscillations; obtaining by means of the inverse Fourier transform of pulsed realizations of the selected resonant peaks on each form of free oscillations of designs; identification and graphical representation of various forms of oscillations of the studied soil, geotechnical structures, etc. An example of vibrodynamic studies of the soil and individual building structures of the buildings of the Post Square to determine the actual dynamic loads on the soil and protective walls of the pit of the construction site is considered.*

**Keywords:** *dynamic certification; protection structures; acceleration; frequency; defects*

---

© Ю.І. Іщенко, А.Є. Вусатиук, 2020

Ю.І. Іщенко<sup>1</sup>, А.Є. Вусатюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державне підприємство «ДП Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» м. Київ, Україна

<sup>2</sup> ТЗОВ «Діджитал продакшн», м. Київ, Україна

## ВРАХУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ НА ГЕОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ В УМОВАХ УЩІЛЬНЕНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ НА ПРИКЛАДІ М. КИЄВА

***Анотація.** Набула подальшого розвитку прикладна методика врахування динамічних впливів на геотехнічні споруди в умовах ущільненої міської забудови при прямих динамічних розрахунках з урахуванням експериментально отриманих акселерограм. Методика включає: візуальне та вібродинамічне обстеження новобудови геотехнічної споруди та існуючих джерел вібродинамічних впливів (з урахуванням природного сейсмічного фону – проведення сейсморайонування майданчика будівництва); побудову розрахункової моделі; виконання прямих динамічних розрахунків протизсувних споруд (стінок котлованів, напружено-деформованого стану оточуючого будівельний майданчик ґрунту, верхньої будови та ін.) з урахуванням фактичних експериментально отриманих акселерограм для досліджуваної геотехнічної споруди (верхньої будови та ін.); аналіз відповідності отриманих розрахункових та проектних даних новобудови чинним нормативним документам по сейсмостійкому будівництву; в разі необхідності – видача рекомендацій щодо підсилення відповідних будівельних конструкцій фундаменту та (або) верхньої будови. Визначення динамічних характеристик ґрунту та будівельних конструкцій відбувається за їх вільними коливаннями малої амплітуди, які порушуються впливом природних або техногенних мікросейсм, включає в себе: реєстрацію коливань за допомогою високочутливих (у нашому випадку – сейсмічних) датчиків; обчислення та аналіз спектрів Фур'є з метою виділення резонансних піків, що відповідають різним формам вільних коливань; отримання за допомогою зворотного перетворення Фур'є імпульсних реалізацій виділених резонансних піків по кожній формі вільних коливань конструкцій; ідентифікація та графічне представлення різних форм коливань досліджуваного ґрунту, геотехнічних конструкцій та ін. Розглянуто приклад вібродинамічних досліджень ґрунту і окремих будівельних конструкцій будівель Поштової площі для визначення фактичних динамічних навантажень на ґрунт та захисні стінки котловану будівельного майданчика.*

***Ключові слова:** динамічна сертифікація; підпірна стінка; прискорення; частота; дефекти*

### Вступ

Сейсмічний (динамічний) ризик є неминучим супутником нашої цивілізації і вимагає адекватного реагування. Динамічна паспортизація будівель і споруд (у тому числі протизсувних), таким чином, є першочерговим етапом робіт із забезпечення необхідного і економічно доцільного рівня сейсмостійкості будівельних об'єктів в умовах морального та фізичного зносу, оцінка сейсмічної (динамічної) уразливості будівель і споруд або можливого ступеня їх пошкоджень при динамічних впливах. Питання динамічної паспортизації будівель і споруд (БС), економічної ефективності будівництва з урахуванням

сейсмічних (динамічних) впливів розглядалися в ряді робіт вітчизняних і зарубіжних дослідників Alonso-Rodriguez A., Anastasopoulos I., Antolini F., Balducci M., Bardi F., Barla M., Basile G., Borja R., Burghignoli A., Burton H., Buttiglia S., Callisto L., Casagli N., Catani F., Chiara A., Ciampalini A., Dao S., Del Ventisette C., Di Traglia F., Frodella W., Gigli G., Kaliukh I., Kalyukh T., Kampas G., Khavkin O., Knappett J., Lacasse S., Liu X.Y., Lollino G., Luzi G., Marienkov N., Martinelli M., Nikitas N., Piccioni R., Polevetskiy V., Regni R., Rathje E., Salvatici T., Senatorov V., Shokrabadi M., Silchenko K., Stewart J., Trofymchuk O., Venanti L.D., Wang Y., White J.A. та ін. [1–17]. У відповідності з їх дослідженнями існуючі методи динамічної паспортизації умовно можна розділити на три групи: методи експертних оцінок, розрахунково-аналітичні методи, методи технічної діагностики. В силу переваг і недоліків, властивих кожному з трьох підходів, методичні проблеми динамічної паспортизації БС можна звести до двох основних проблем. Перша проблема – це коректне визначення критерію при оцінці сейсмостійкості обстежуваних БС. Друга проблема – це визначення необхідного рівня впливу, при якому досліджується динамічна структура БС: мікродинамічний рівень при пружній стадії роботи конструкцій або рівень навантаження, відповідний роботі конструкцій БС за межею пружності.

На жаль, єдиної узаконеної на рівні стандарту методики динамічної паспортизації на сьогоднішній день в Україні не існує. В силу цього, вдосконалення методів динамічних обстежень та математичного моделювання БС для оцінки їх фактичної сейсмостійкості, у т.ч. з урахуванням фізичного зносу конструкцій, є актуальною проблемою для України.

## **1. Прикладна методика**

Пропонується прикладна методика динамічної паспортизації та оцінки технічного стану протизсувних споруд (ПЗС) як підрозділу БС. Методика включає: візуальне та вібродинамічне обстеження ПЗС; побудову розрахункової моделі та виконання розрахунків з урахуванням фактичних акселерограм на динамічні впливи (техногенного та сейсмічного походження); порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових даних; рекомендації щодо ремонту та відновлення, подальшої експлуатації ПЗС. Визначення динамічних характеристик за їх вільними коливаннями малої амплітуди, які ініціюються впливом природних (або техногенних) мікросейсм, включає в себе наступні операції:

- реєстрацію коливань ПЗС за допомогою високочутливих (у нашому випадку – акселерометричних) датчиків;
- обчислення та аналіз спектрів Фур'є з метою виділення резонансних піків, що відповідають різним формам вільних коливань; отримання за допомогою зворотного перетворення Фур'є імпульсних реалізацій виділених резонансних піків по кожній формі вільних коливань ПЗС;
- ідентифікація та графічне представлення різних форм коливань конструкцій.

## **2. Case study. Реконструкція Поштової площі**

Поштова площа розташована в центрі Києва, обмежена Набережним шосе вздовж берега річки Дніпро і Володимирським узвозом біля підніжжя

Володимирської гірки, під яким проходять тунелі метрополітену. Площа забудована безліччю будівель, серед яких Поштовий будинок (пам'ятка історії XIX століття, який дав назву площі), церква Різдва Христового, річковий вокзал, група адміністративних споруд початку і середини XX століття (рис. 1).



Рис. 1 – Архітектурний макет Поштової площі після реконструкції

До ускладнюючих геотехнічних умов майданчика відносяться: слабкі водонасичені ґрунти заплавних відкладень р. Дніпро, високий рівень ґрунтових вод, який зрегульований тунелями метрополітену, зсувонебезпечний схил Володимирської гірки. Існуюча забудова, автомобільна дорога і лінія метрополітену обумовлюють підвищені вимоги до проектних рішень з врахування динамічних впливів різної інтенсивності та величини.

Реконструкція Поштової площі є одним з найбільших інфраструктурних проектів в Києві за останні роки (рис. 2). Через площу проходять великі транспортні потоки в напрямку «північ-південь», і відсутність на цій території сучасного транспортного вузла ускладнює автомобільний рух та підсилює відповідні динамічні впливи. Реалізація цього проекту дозволила значно поліпшити транспортне сполучення в центральній історичній частині міста і впорядкувати забудову Подільського району міста з вільним виходом до р. Дніпро. Проект реконструкції передбачав будівництво автомобільного тунелю з рухом в двох напрямках по дві смуги, надземної транспортної естакади (перша черга будівництва), а також двоповерхового підземного торгового комплексу загальною площею близько 8000 м<sup>2</sup> (друга черга будівництва) та комплексний благоустрій території з влаштуванням скверу та фонтану.



Рис. 2 – Поштова площа під час реконструкції

З огляду на значимість споруди для м. Києва та складність інженерно-геологічних умов будівельного майданчика, проектування і будівництво виконувалось при багатосторонньому науково-технічному супроводі та дотриманні концепції «зеленого будівництва» в умовах ущільненої міської забудови [18, 19]. В процесі робіт вирішувалися проблеми збереження пам'яток історії та архітектури і інших навколишніх будівель, забезпечення надійної експлуатації лінії метрополітену, міцності і надійності споруд, що зводяться, збереження гідрогеологічного режиму території та інші питання. Згідно з рекомендаціями діючих норм при проведенні підготовчих робіт до будівництва і в ході самого будівництва необхідно було виконувати роботи з науково-технічного супроводу об'єкта. Виконання вібродинамічних досліджень на майданчику будівництва є одним з важливих заходів щодо контролю та забезпечення вимог нормативних документів [20–22].

Для визначення фактичних динамічних навантажень на ґрунт і захисні протизсувні конструкції котловану були виконані роботи із вібродинамічних досліджень ґрунту і окремих будівельних конструкцій будівель Поштової площі [23–25].

### **3. Методика проведення вібродинамічних випробувань несучих конструкцій станції метрополітену та ґрунту майданчика реконструкції**

Методика встановлює порядок виконання робіт при динамічних випробуваннях. Розробка методики випробувань виконувалась на основі нормативних документів [20–27]. Методикою передбачено виконання таких завдань:

1. Провести аналіз проектної документації станції метрополітену «Поштова площа» та майданчика реконструкції.

2. Провести вибір та підготовку віброметричної апаратури для динамічних випробувань.

3. Розробити схеми розміщення вібродатчиків для проведення обстежень будівель та ґрунту з врахуванням особливостей руху всіх видів транспорту.

4. Провести записи коливань ґрунту (рис. 3) та конструкцій станції метрополітену (рис. 4).



Рис. 3 – Загальний вигляд віброметричної апаратури під час її тарування при динамічних дослідженнях ґрунту

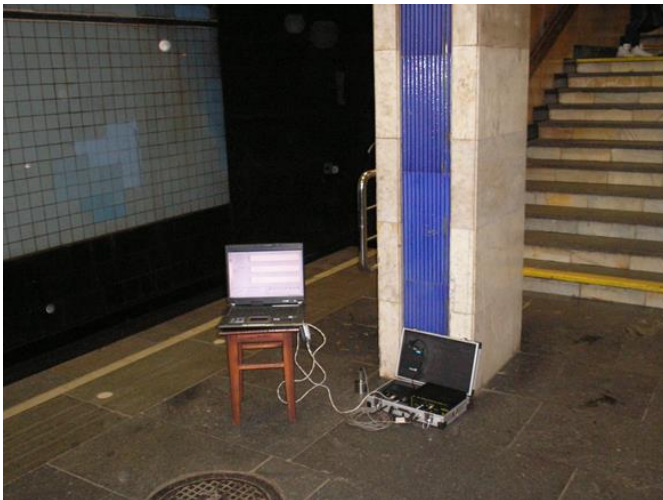


Рис. 4 – Загальний вигляд віброметричної апаратури під час її тарування і при динамічних дослідженнях конструкцій

5. Провести обробку одержаних записів коливань та виконати їх аналіз на основі спектрального методу. Побудувати графіки віброприскорень та їх спектри в реальному часі по кожному із напрямків X ,Y та Z для кожного із об'єктів випробувань.

6. На основі виконаних віброметричних обстежень визначити рівні вібрації ґрунту та конструкцій.

#### 4. Вибір та підготовка віброметричної апаратури для виконання випробувань

Реєстрація вібросигналів виконується однокомпонентними віброперетворювачами (датчики вібрації) моделі 731А фірми „Wilcoxon research” (США). Оцінка рівня коливань об’єктів випробувань проводиться на основі вимірювання віброприскорень за допомогою вказаних датчиків вібрації при динамічних впливах від руху наземного транспорту, потягів метрополітену та при роботі будівельної техніки. В таблиці 1 представлений перелік апаратури, яка використовувалась при вібродинамічних дослідженнях ґрунту та будівельних конструкцій станції метрополітену «Поштова площа».

Таблиця 1 – Склад та комплектність віброметричної апаратури для вібродинамічних випробувань

Найменування приладу	Кількість, шт.	Призначення
Віброперетворювач (датчик вібрації) моделі 731А з кабелем довжиною до 5 м	3	Перетворення механічних коливань в електричний сигнал
Модуль вимірювання низькочастотної вібрації МИНВ-01 (комплектуються спільно з датчиком вібрації)	3	Передача даних вимірювань на базову станцію за допомогою радіосигналу
Ноутбук (живлення автономне)	1	Наявність програмного забезпечення для запису сигналів, обробки даних та візуалізації результатів вимірювань
Програмне забезпечення для запису сигналів, обробки даних та візуалізації результатів вимірювань „Сейсмомоніторинг”	1	Побудова графіків сигналів та їх спектрів для проведення аналізу

Обробка записів коливань проводилась з використанням спеціалізованої програми „Сейсмомоніторинг”, в якій реалізовано спектральний метод обробки вібраційних сигналів [28]. Вказана в табл. 1 віброметрична апаратура повірена в „Укрметртестстандарт”, і видані свідоцтва про проведену повірку.

#### 5. Схеми розміщення вібродатчиків на конструкціях станції метрополітену та ґрунті для виконання вібродинамічних випробувань

В рамках розробленої методики були реалізовані наступні схеми розміщення вібродатчиків для випробувань ґрунту та конструкцій тунелю станції «Поштова площа». Схеми розстановки датчиків вібрації при вібродинамічних дослідженнях ґрунту на Поштової площі наведені на рис. 5 та 7–9, конструкцій станції метрополітену – на рис. 6.

Призначення кожної з наведених схем: Схема №1 – для вимірювання коливань у вертикальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі. Схема №2 – для вимірювання коливань у горизонтальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі. Схема №3 – для вимірювання коливань у вертикальному напрямку на платформі станції «Поштова площа».

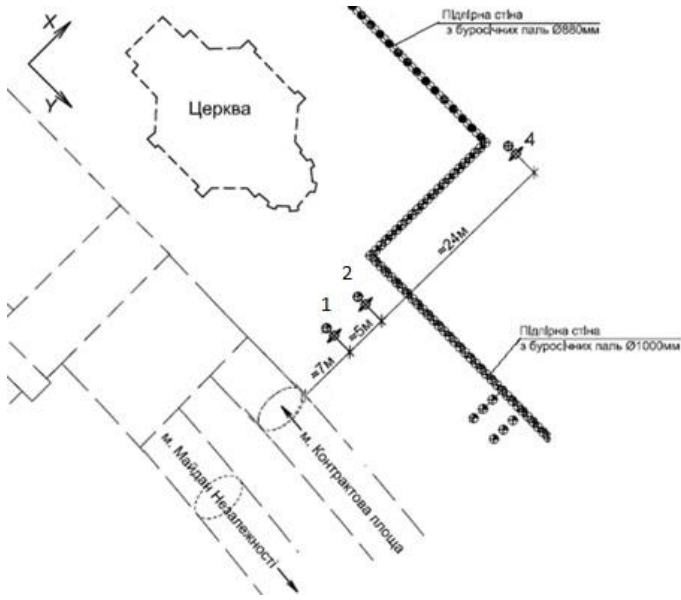


Рис. 5 – Схеми розстановки вібродатчиків: №1 (датчики – вертикально) та №2 (датчики вздовж осі X) на Поштовій площі

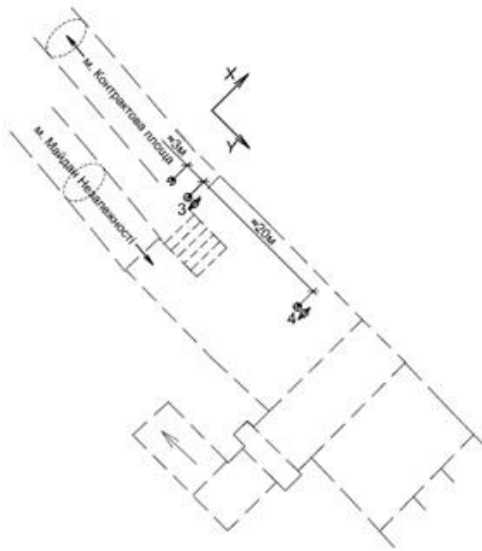


Рис. 6 – Схеми розстановки вібродатчиків на платформі станції і в тунелі: №3 – вимірювання коливань у вертикальному напрямку; №4 – вимірювання коливань у горизонтальному напрямку

Схема №4 – для вимірювання коливань у горизонтальному напрямку на платформі станції «Поштова площа», датчик вібрації (ДВ) №2 орієнтований вертикально, ДВ3 та ДВ4 – горизонтально. Схема №5 – для вимірювання коливань у вертикальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі. Схема №6 – для вимірювання коливань у горизонтальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі. Схема №7 – для вимірювання



коливань у вертикальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі. Схема №8 – для вимірювання коливань у горизонтальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі. Схема №9 – для вимірювання коливань у вертикальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі. Схема №10 – для вимірювання коливань у горизонтальному напрямку на майданчику реконструкції Поштової площі.

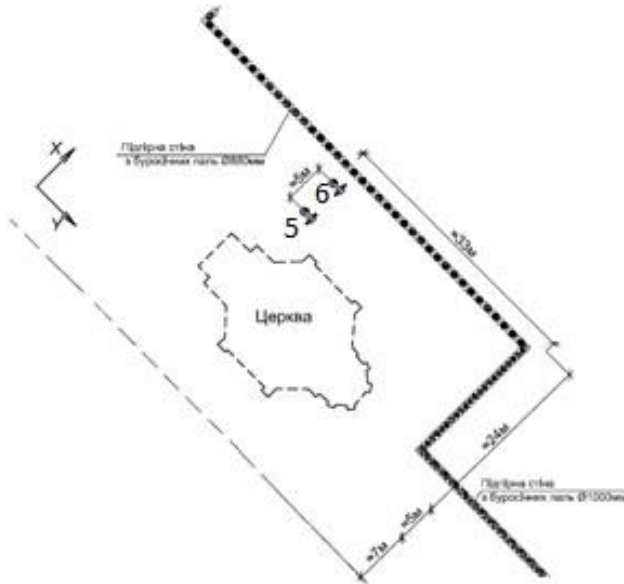


Рис. 7 – Схеми розстановки вібродатчиків на Поштовій площі (грунт):  
№5 – вимірювання коливань у вертикальному напрямку; №6 – вимірювання коливань у горизонтальному напрямку вздовж осі X

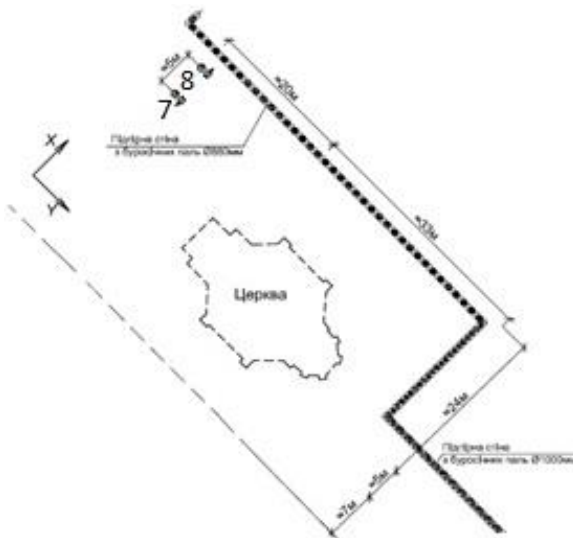


Рис. 8 – Схеми розстановки вібродатчиків на Поштовій площі (грунт):  
№7 – вимірювання коливань у вертикальному напрямку; №8 – вимірювання коливань у горизонтальному напрямку вздовж осі X

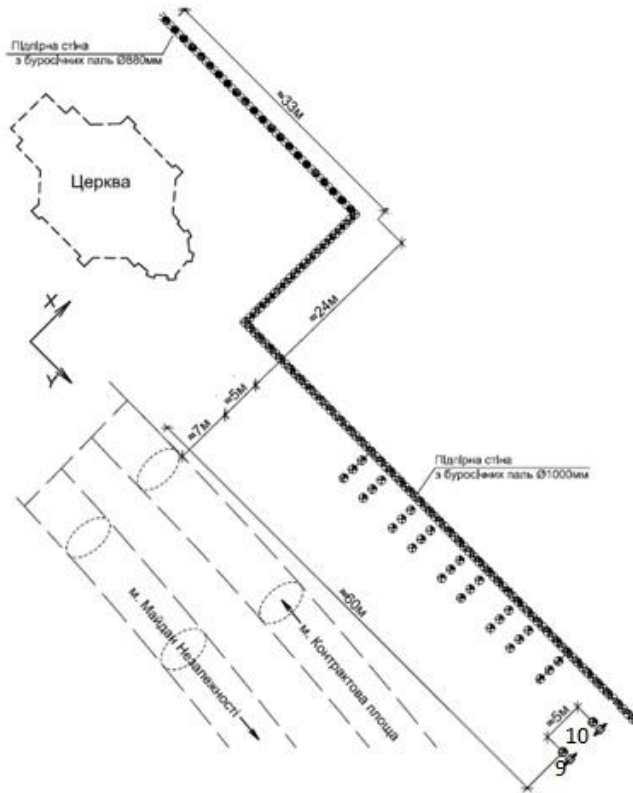


Рис. 9 – Схеми розстановки вібродатчиків на Поштовій площі (грунт):  
№9 – вимірювання коливань у вертикальному напрямку; №10 – вимірювання коливань у горизонтальному напрямку вздовж осі X

## 6. Результати вібродинамічних випробувань конструкцій станції метрополітену «Поштова площа»

Вібродинамічні обстеження станції метрополітену «Поштова площа» та ґрунту на майданчику реконструкції були проведені в денний час у квітні 2013 р. Динамічні обстеження станції метрополітену та ґрунту майданчика реконструкції площі здійснювались відповідно до положень розробленої методики. Результати вібродинамічних обстежень включають графіки віброприскорень та їх амплітудні спектри. Динамічний вплив на БС та ґрунт фіксувався безпосередньо при візуальній оцінці наявності автотранспорту на проїзній частині, при роботі будівельної техніки. Динамічний вплив рухомих потягів метрополітену на конструкції визначався на основі проведених записів віброприскорень та при візуальній оцінці.

На рис. 10 та 11 представлений графік часових сигналів вертикальних та горизонтальних віброприскорень конструкцій станції метрополітену «Поштова площа», відповідно.

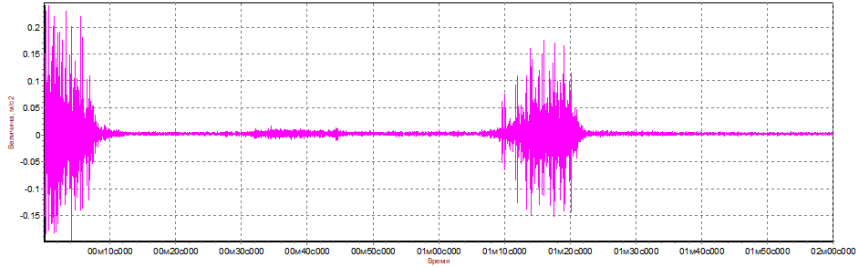


Рис. 10 – Графіки часових сигналів вертикальних віброприскорень конструкцій станції метрополітену «Поштова площа»

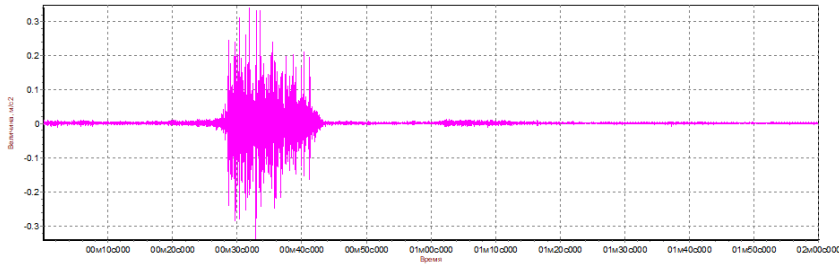


Рис. 11 – Графіки часових сигналів горизонтальних віброприскорень конструкцій станції метрополітену «Поштова площа»

## 7. Результати вібродинамічних випробувань майданчика реконструкції Поштової площі

При проведенні записів віброприскорень на ґрунті майданчика реконструкції Поштової площі найбільший рівень віброприскорень був зафіксований вібродатчиком ДВ2, що знаходився на мінімальній відстані від лінії метрополітену. При цьому додатковий динамічний вплив на прилеглий ґрунт створювався одночасним впливом рухомого автотранспорту, потягами метрополітену та працюючою будівельною технікою. Графіки горизонтальних та вертикальних часових сигналів віброприскорень ґрунту майданчика реконструкції Поштової площі наведені на рис. 12 та 13, відповідно.

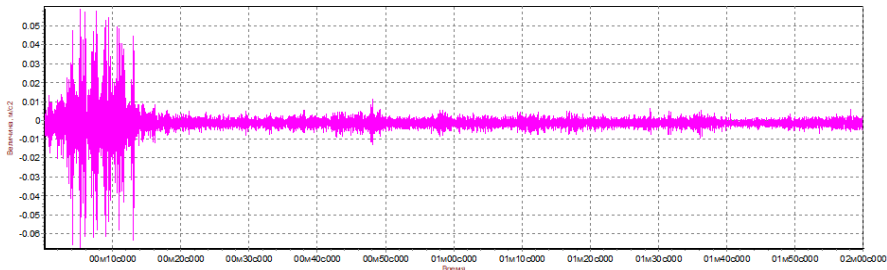


Рис. 12 – Графіки часових сигналів вертикальних віброприскорень майданчика реконструкції Поштової площі

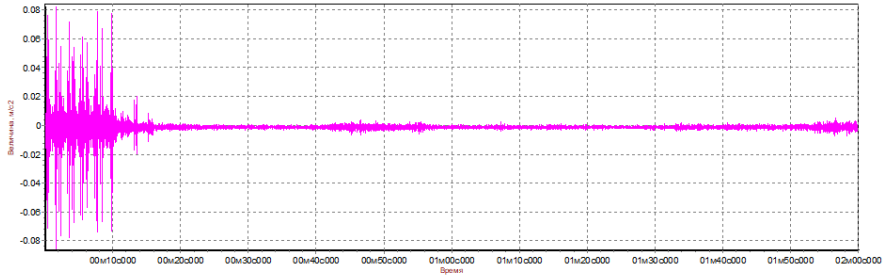


Рис. 13 – Графіки часових сигналів горизонтальних віброприскорень майданчика реконструкції Поштової площі

Амплітудний спектр горизонтальних та вертикальних віброприскорень ґрунту майданчика реконструкції Поштової площі наведено на рис. 14 та 15.

Маркер  $f=40.5000$  Гц      $A=0.0016$  м/с<sup>2</sup>

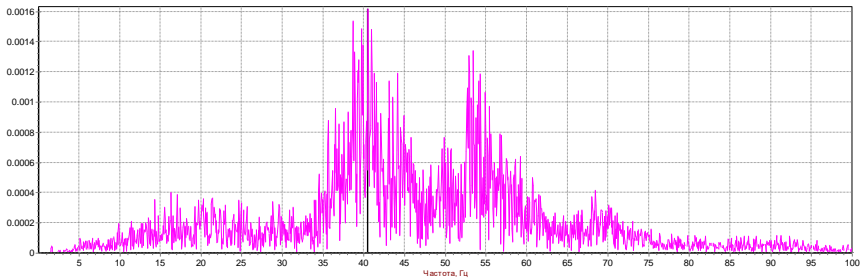


Рис. 14 – Амплітудний спектр вертикальних віброприскорень майданчика реконструкції Поштової площі

Маркер  $f=44.8750$  Гц      $A=0.0018$  м/с<sup>2</sup>

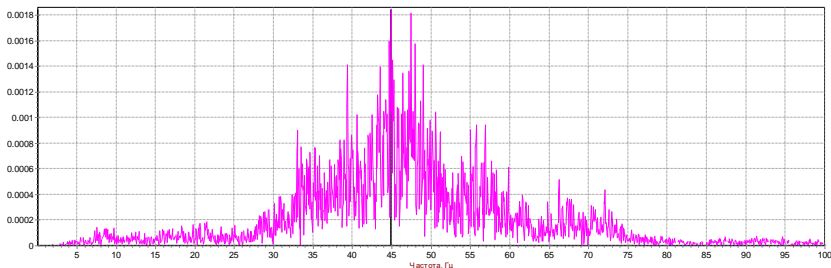


Рис. 15 – Амплітудний спектр горизонтальних віброприскорень майданчика реконструкції Поштової площі

## 8. Аналіз результатів динамічних обстежень будівельних конструкцій станції метрополітену «Поштова площа» та ґрунту

Максимальні амплітуди віброприскорень при вібродинамічних обстеженнях будівельних конструкцій станції метрополітену та ґрунту майданчика реконструкції Поштової площі наведені в таблиці 2.

Максимальне значення амплітуд віброприскорень з врахуванням одночасної дії всіх видів динамічного впливу, зафіксоване для будівельних конструкцій станції метрополітену «Поштова площа», складас значення

35 см/с<sup>2</sup> для платформи станції для вертикальної схеми та 30 см/с<sup>2</sup> для горизонтальної. Максимальне значення амплітуд віброприскорень з врахуванням одночасної дії всіх видів динамічного впливу, зафіксоване для ґрунту майданчика реконструкції Поштової площі, складає 7,3 см/с<sup>2</sup> для вертикальної схеми та 15,1 см/с<sup>2</sup> для горизонтальної.

Таблиця 2 – Максимальні амплітуди віброприскорень (см/с<sup>2</sup>) при вібродинамічних обстеженнях будівельних конструкцій станції метрополітену та ґрунту майданчика реконструкції Поштової площі

Вісь	№ датчика		
	2	3	4
Розташування по схемі 1			
X	–	–	–
Z	7,3	0,19	2,5
Розташування по схемі 2			
X	8,5	15,1	1,4
Z	–	–	–
Розташування по схемі 3			
X	–	–	–
Z	35,0	17,0	30,0
Розташування по схемі 4			
X	–	25	35
Z	30	–	–
Розташування по схемі 5			
X	–	–	–
Z	3,25	3	–
Розташування по схемі 6			
X	1,82	1,68	–
Z	–	–	–
Розташування по схемі 7			
X	–	–	–
Z	3,4	3,1	–
Розташування по схемі 8			
X	1,89	1,75	–
Z	–	–	–

## Висновки

За результатами проведених натурних вібродинамічних обстежень конструкції станції метрополітену «Поштова площа», вібродинамічних обстежень ґрунту та стінок котловану майданчика реконструкції при впливах автотранспорту, роботі будівельної техніки та рухомих потягів метрополітену можна зробити наступні висновки:

1. Зареєстровані максимальні значення вертикальних віброприскорень поверхні ґрунту у місці розташування підпірної стінки на майданчику реконструкції Поштової площі з врахуванням одночасної дії автотранспорту, будівельної техніки та потягів метрополітену складає 7,3 см/с<sup>2</sup>. На глибині 13 м розрахункові значення вертикальних прискорень ґрунту дорівнюють 19 см/с<sup>2</sup>. Тому при розрахунках конструкцій підпірної стінки динамічні вертикальні навантаження на її конструкції необхідно додатково врахувати як 2–5% від статичних навантажень (у підсумку враховується 1,05–1,02 статичних навантажень).

2. Зареєстровані максимальні значення горизонтальних віброприскорень поверхні ґрунту у місці розташування підпірної стінки на майданчику реконструкцій Поштової площі з врахуванням одночасної дії автотранспорту, будівельної техніки та потягів метрополітену складає  $15,1 \text{ см/с}^2$ . На глибині 13 м розрахункові значення прискорень ґрунту дорівнюють  $39 \text{ см/с}^2$ . Тому при розрахунках конструкцій підпірної стінки слід додатково врахувати динамічні горизонтальні навантаження на її конструкції як 4–7% від статичних навантажень (*у підсумку враховується 1,07–1,04 статичних навантажень*).

3. Зареєстровані максимальні значення вертикальних віброприскорень конструкцій станції метрополітену «Поштова площа» при русі одного потягу складають  $35 \text{ см/с}^2$ . Динамічні вертикальні навантаження на конструкції станції при одночасному русі двох потягів метрополітену не перевищують 9% статичних навантажень.

4. Зареєстровані максимальні значення горизонтальних віброприскорень конструкцій станції метрополітену «Поштова площа» при русі одного потягу складає  $30 \text{ см/с}^2$ . Динамічні горизонтальні навантаження на конструкції станції при одночасному русі двох потягів метрополітену не перевищують 8% статичних навантажень.

5. Частоти коливань конструкцій станції метрополітену «Поштова площа» та ґрунту майданчику реконструкції при впливах потягів метрополітену зареєстровані у діапазоні 20–90 Гц.

6. З метою подальшого контролю рівнів вібрації ґрунту і конструкцій станції метрополітену доцільно проводити їх періодичний вібромоніторинг [29–31].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alonso-Rodriguez A., Nikitas N., Knappett J., Kampas G., Anastasopoulos I., Fuentes R. 2018 System identification of tunnel response to ground motion considering a simplified model. *Frontiers in Built Environment* 4: 1-11.
2. Balducci M., Regni R., Buttiglia S., Piccioni R., Venanti L.D., Casagli N., Gigli G. 2011. Design and built of a ground reinforced embankment for the protection of a provincial road (Assisi, Italy) against rockslide. *Proc. XXIV Conv. Naz. Geotecnica, AGI, Napoli, 22th-24th June 2011*.
3. Barla M., Antolini F., Dao S. 2014. Il monitoraggio delle frane in tempo reale. *Strade e Autostrade* 107: 154–157.
4. Borja R.I., White J.A., Liu X.Y., Wu W. 2011. Factor of safety in a partially saturated slope inferred from hydro-mechanical continuum modeling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 63(2): 140-154.
5. Casagli N., Catani F., Del Ventisette C., Luzi G. 2010. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides* 7(3): 291-301.
6. Frodella W., Ciampalini A., Bardi F., Salvatici T., Di Traglia F., Basile G., Casagli N. 2018. A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas *Landslides*, 15(2): 183-197.
7. Ginzburg L., Shvec V. 1987. *Soil dynamics and mechanics guide*. Kiev: Budivelnik.
8. Gomilko A., Savickii O., Trofymchuk O. 2016. *Dynamics of porous elastic fluid-saturated medium*. Kiev: Naukova Dumka.
9. Highland L., Bobrowsky P. 2008. *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular.
10. Intrieri E., Gigli G., Gracch T., Nocentini M., Lombardi L., Mugnai F., Frodella W., Bertolini G., Carnevale E., Favalli M., Fornaciai A., Alavedra J. M., Mucchi L., Nannipieri L., Rodriguez-Lloveras X., Pizziolo M., Schina R., Trippi F., Casagli N. 2018

- Application of an ultra-wide band sensor-free wireless network for ground monitoring. *Engineering Geology*, 238: 1-14.
11. Kaliukh I., Senatorov V., Marienkov N., Trofymchuk O., Silchenko K., Kalyukh T. 2015. Arrangement of deep foundation pit in restricted conditions of city build-up in landslide territory with considering of seismic loads of 8 points. *Proceedings XVI ECSMGE, Edinburgh, 13th-17th September 2015*.
  12. Kaliukh, I., Senatorov, V., Khavkin, O., Kaliukh, T., Khavkin, K. 2013. Experimentally-analytical researches of the technical state of reinforce-concrete constructions for defense from landslide's pressure in seismic regions of Ukraine. *Proceedings of the Fib Symposium, Tel-Aviv, 22-24 April 2013*.
  13. Lacasse S. 2013 Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, September 2-6, 2013*.
  14. Lollino G., Chiara A. 2006. UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard. *Landslides*. 3(4): 311-321.
  15. Martinelli M., Burghignoli A., Callisto L. 2016. Dynamic response of a pile embedded into a layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 87: 16-28.
  16. Shokrabadi M., Burton H.V., Stewart J.P. 2018. Impact of Sequential Ground Motion Pairing on Mainshock-Aftershock Structural Response and Collapse Performance Assessment. *Structural Engineering* 144 (10): 04018177.
  17. Trofymchuk O., Kaliukh I., Silchenko K., Polevetskiy V., Berchun V., Kalyukh T. 2015. Use accelerogram of real earthquakes in the evaluation of the stress-strain state of landslide slopes in seismically active regions of Ukraine. In: Lollino G. et al. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory. Part 2*. Berlin: Springer-Verlag.
  18. Ваничек І. Применение Еврокода 7 к грунтовым конструкциям // *Світ геотехніки*. – № 4, 2016. С. 4-8.
  19. Фаренюк Г.Г., Калюх Ю.І., Іщенко Ю.І. Концепція «зеленого будівництва» та її застосування при проектуванні та розрахунках геотехнічних конструкцій / Г.Г. Фаренюк, Ю.І. Калюх, Ю.І. Іщенко // *Наука та будівництво*. – 2020, № 2. – С. 19-43.
  20. ДБН В.1.2-5:2007. «Науково-технічний супровід будівельних об'єктів». – К.: Укрбудархінформ, 2007. – 14 с.
  21. ДБН В.1.2-12-2008. «Будівництво в умовах ущільненої забудови. Вимоги безпеки» – К.: Укрбудархінформ, 2007. – 34 с.
  22. ДБН В.1.2-14:2018. «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд» – К.: Укрбудархінформ, 2018. – 30 с.
  23. ДБН В.1.1-2006 "Будівництво у сейсмічних районах України". Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-427>
  24. Ukraine Building Code. 2009. B.2.1-10: 2009. Bases and foundations of facilities. Main provisions of design. Kiev: Dergbud.
  25. USSR Building Code. 1988. 2.02.05:87. Construction norms and rules. Foundations of machines with dynamic loads. Moscow: Stroizdart.
  26. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011.
  27. ДБН В. 1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006.
  28. Руководство пользователя. Программа «Сейсмомониторинг». – Киев: «Диатос», НТУ «КПИ», 2009.
  29. Kaliukh Iu.I., Klymenkov O.A. and Berchun Y.O. (2016). The Livadia palace monitoring under the changes in the physical and mechanical characteristics of the Central Livadia Landslide System soils. Ecological safety and natural resources. – № 1-2 (21). – P. 69-82.
  30. Trofymchuk O., Kaliukh I., Hlebchuk H. & Berchun V. (2013). Experimental and Analytical Studies of Landslides in the South of Ukraine Under the Action of Natural Seismic Impacts. *Earthquake-Induced Landslides*. – P. 883-892.

31. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., Klymenkov, O. (2017). TXT-tool 2.380-1.1. Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. Volume 1.* Springer, Cham., 491-508.

Стаття надійшла до редакції 22.04.2020 і прийнята до друку після рецензування 30.06.2020

## REFERENCE

1. Alonso-Rodriguez, A., Nikitas, N., Knappett, J., Kampas, G., Anastasopoulos, I., & Fuentes, R. (2018). System identification of tunnel response to ground motion considering a simplified model. *Frontiers in Built Environment*, 4, 1-11.
2. Balducci, M., Regni, R., Buttiglia, S., Piccioni, R., Venanti, L.D., Casagli, N., & Gigli, G. (2011). Design and built of a ground reinforced embankment for the protection of a provincial road (Assisi, Italy) against rockslide. In *Proc. XXIV Conv. Naz. Geotecnica*, AGI, Napoli, 22th-24th June 2011.
3. Barla, M., Antolini, F., & Dao, S. (2014). Il monitoraggio delle frane in tempo reale. *Strade e Autostrade*, 107, 154–157.
4. Borja, R.I., White, J.A., Liu, X.Y., & Wu, W. (2011). Factor of safety in a partially saturated slope inferred from hydro-mechanical continuum modeling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 63(2), 140-154.
5. Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C., & Luzi, G. (2010). Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides*, 7(3), 291-301.
6. Frodella, W., Ciampalini, A., Bardi, F., Salvatici, T., Di Traglia, F., Basile, G., & Casagli, N. (2018). A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas. *Landslides*, 15(2), 183-197.
7. Ginzburg, L., & Shvec, V. (1987). *Soil dynamics and mechanics guide*. Kiev: Budivelnik. (in Russian)
8. Gomilko, A., Savickii, O., & Trofymchuk, O. (2016). *Dynamics of porous elastic fluid-saturated medium*. Kiev: Naukova Dumka. (in Russian)
9. Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular.
10. Intrieri, E., Gigli, G., Gracch, T., Nocentini, M., Lombardi, L., Mugnai, F., et al. (2018). Application of an ultra-wide band sensor-free wireless network for ground monitoring. *Engineering Geology*, 238, 1-14.
11. Kaliukh, I., Senatorov, V., Marienkov, N., Trofymchuk, O., Silchenko, K., & Kalyukh, T. (2015). Arrangement of deep foundation pit in restricted conditions of city build-up in landslide territory with considering of seismic loads of 8 points. In *Proceedings XVI ECSMGE*, Edinburgh, 13th-17th September 2015.
12. Kaliukh, I., Senatorov, V., Khavkin, O., Kaliukh, T., & Khavkin, K. (2013). Experimentally-analytical researches of the technical state of reinforce-concrete constructions for defense from landslide's pressure in seismic regions of Ukraine. In *Proceedings of the Fib Symposium*, Tel-Aviv, April 22-24, 2013.
13. Lacasse, S. (2013). Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, September 2-6, 2013.
14. Lollino, G., & Chiara, A. (2006). UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard. *Landslides*, 3(4), 311-321.
15. Martinelli, M., Burghignoli, A., & Callisto, L. (2016). Dynamic response of a pile embedded into a layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 87, 16-28.
16. Shokrabadi, M., Burton, H.V., & Stewart, J.P. (2018). Impact of Sequential Ground Motion Pairing on Mainshock-Aftershock Structural Response and Collapse Performance Assessment. *Structural Engineering*, 144 (10), 04018177.



17. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., Silchenko, K., Polevetskiy, V., Berchun, V., & Kalyukh, T. (2015). Use accelerogram of real earthquakes in the evaluation of the stress-strain state of landslide slopes in seismically active regions of Ukraine. In: Lollino G. et al. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory. Part 2*. Berlin: Springer-Verlag.
18. Vanychek, I. (2016). Prymenenye Evrokoda 7 k hruntovym konstruktsiyam [Application of Eurocode 7 to soil structures]. *Svit heotekhniki*, 4, 4-8. (in Russian)
19. Farenjuk, G.G., Kaljukh, I.I., & Ishhenko, Ju.I. (2020). Konceptcija «zelenogo budivnytva» ta i'i' zastosuvannja pry proektuvanni ta rozrahunkah geotekhnichnyh konstrukcij. *Nauka ta budivnytvo*, 2, 19-43. (in Ukrainian)
20. DBN V.1.2-5:2007 «Naukovo-tekhnicnyi suprovid budivelnykh ob'ektiv». (2007). K.: Ukrbudarkhinform. (in Ukrainian)
21. DBN V.1.2-12:2008 «Budivnytstvo v umovakh uschilненоi zabudovy. Vymohy bezpeky». (2007). K.: Ukrbudarkhinform. (in Ukrainian)
22. DBN V.1.2-14:2018. Zagal'ni pryncypy zabezpechennja nadijnosti ta konstruktyvnoi' bezpeky budivel' i sporud. (2018). K.: Ukrbudarkhinform. (in Ukrainian)
23. DBN V.1.1-2006 Budivnytstvo u sejsmichnyh rajonah Ukrai'ny. Retrieved from: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-427> (in Ukrainian)
24. Ukraine Building Code. B.2.1-10: 2009. (2009). Bases and foundations of facilities. Main provisions of design. Kiev: Dergbud.
25. USSR Building Code. 2.02.05:87. (1988). Construction norms and rules. Foundations of machines with dynamic loads. Moscow: Stroizdart.
26. DBN V.2.6-98:2009. (2011). Betonni ta zalizobetonni konstrukcii'. K.: Ministerstvo regional'nogo rozvytku ta budivnytva Ukrai'ny. (in Ukrainian)
27. DBN V. 1.2-2:2006. (2006). Navantazhennja i vplyvy. Normy proektuvannja. Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeky budivel'nyh ob'ektiv. Ministerstvo budivnytva, arhitektury ta zhytlovo-komunal'nogo gospodarstva Ukrai'ny. (in Ukrainian)
28. Rukovodstvo pol'zovatelja. Programma «Sejsmomonitoring». (2009). Kiev: «Diatos», NTU «KPI». (in Russian)
29. Kaliukh, Iu.I., Klymenkov, O.A., & Berchun, Y.O. (2016). The Livadia palace monitoring under the changes in the physical and mechanical characteristics of the Central Livadia Landslide System soils. *Environmental safety and natural resources*, 1-2 (21), 69-82. (in Ukrainian)
30. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., Hlebchuk, H. & Berchun V. (2013). Experimental and Analytical Studies of Landslides in the South of Ukraine Under the Action of Natural Seismic Impacts. *Earthquake-Induced Landslides*, 883-892.
31. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., & Klymenkov, O. (2017). TXT-tool 2.380-1.1. Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools*. Volume 1. Springer, Cham., 491-508.

*The article was received 22.04.2020 and was accepted after revision 30.06.2020*

### **Ищенко Юрий Иванович**

здобувач, завідувач лабораторії державного підприємства «ДП Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2

ORCID ID 0000-0001-6046-8180 *e-mail*: ischenko@ndibk.gov.ua

### **Вусатюк Андрій Євгенович**

кандидат технічних наук, дослідник

ТзОВ «Діджитал продакшн»

ORCID ID 0000-0002-3096-3188 *e-mail*: avusatiuk@gmail.com