

Моніторинг та оцінка деформації поверхні землі від гравітаційного впливу Місяця і Сонця у геодинамічно різних зонах Києва та Кривого Рогу

С.В. Щербина¹, І.А. Черевко², П.Г. Пігулевський¹, Т.В. Кріль³,
О.О. Калініченко¹, А.І. Фещенко¹, А.О. Романенко⁴,
О.Д. Романченко², О.О. Чалий¹, 2026

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

²Національний заповідник «Києво-Печерська лавра», Київ, Україна

³Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

⁴Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

Надійшла 16 березня 2026 р.

Діяльність людини, така як видобуток корисних копалин у Криворізькому районі, суттєво змінила геологічне середовище, вплинувши на стабільність ґрунтів та створивши додаткові ризики для будівель, інфраструктури та міських об'єктів. Подібний процес дестабілізації навколишнього середовища відбувся набагато раніше в районі Києво-Печерської лаври, де зміни геологічного середовища також вплинули на історичні архітектурні споруди та культурні пам'ятки. Хоча ці процеси відбувалися в різних століттях і були зумовлені різними історичними та економічними чинниками, їхні наслідки мають схожі закономірності. В обох регіонах зафіксовано тріщини різного ступеня вираженості, локальні просідання ґрунту та поступове зміщення будівель у бік зон, що містять підземні порожнини як природні, так і штучні.

У цьому дослідженні використовуються високоточні лазерні інклінометри української розробки, які виявляють невеликі кутові деформації поверхні ґрунту та дають змогу аналізувати чинники, що сприяють нестабільності схилів і рухові ґрунту в районах із вираженим перепадом висот та складною морфологією.

Для експериментального моніторингу було встановлено два однакові лазерні інклінометри: у Києві та Кривому Розі. Один із приладів, сертифікований Державним підприємством «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», відповідає сучасним національним стандартам точності, забезпечуючи надійні дані щодо зміщення ґрунту. Результати свідчать про те, що місячно-сонячні припливні сили можуть впливати на стабільність поверхневих шарів ґрунту, особливо в регіонах із значним перепадом висот та підземними порожнинами.

Ці висновки демонструють значний потенціал моніторингу за допомогою лазерного інклінометра для дослідження геодинамічних процесів, оцінювання ризиків деформації, прогнозування небезпечних рухів ґрунту та підвищення безпеки у районах зі складною морфологією поверхні та підземними порожнинами.

Ключові слова: моніторинг за допомогою лазерного інклінометра, місячно-сонячні припливні сили, деформація ґрунту, стійкість схилів, підземні порожнини, геодинамічні небезпеки, міська геофізика, Києво-Печерська Лавра, Кривий Ріг.

Вступ. Проблема стабільності геологічного середовища в межах великих урбанізованих територій та промислових агломерацій набуває особливої гостроти

Citation: Shcherbyna, S.V., Cherevko I.A., Pigulevsky, P.G., Kril, T.V., Kalinichenko, O.O., Feshchenko, A.I., Romanenko, A.O., Romanchenko, O.D., & Chaly, O.O. (2026). Monitoring and assessment of earth surface deformation due to the gravitational influence of the Moon and the Sun in geodynamically different zones of Kyiv and Kryvyi Rih. *Geofizychnyi Zhurnal*, 48(3), 127—144. <https://doi.org/10.24028/gj.v48i3.354369>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

в умовах зростаючого техногенного навантаження. Традиційно при оцінюванні ризиків виникнення небезпечних геологічних процесів, таких як зсуви ґрунту в Києві або деформації земної поверхні над шахтними полями Кривого Рогу, основна увага приділяється гідрогеологічним чинникам, вібраційному навантаженню та зміні напруженого стану масиву через будівельні чи гірничі роботи. Проте поза увагою часто залишається фундаментальний космічний чинник — варіації гравітаційного поля, зумовлені зміною взаємного розташування Землі, Місяця та Сонця. Гравітаційні припливи (solid earth tides) викликають періодичні деформації твердої оболонки Землі [Heaton, 1982; Wilcock, 2001; Kasahara, 2002; Cochran et al., 2004; Довбнич, 2007; Довбнич, Солдатенко, 2008, 2010; Metivier et al., 2009; Пигулевский и др., 2013; Kechebour, 2015; Lu et al., 2018; Pihulevskiy et al., 2021], що проявляються у вертикальних зміщеннях поверхні (до 30—50 см) і варіаціях об'ємного стиснення і розтягнення гірських порід. Хоча енергія цих деформацій значно менша за енергію тектонічних процесів, їх циклічність і повсюдність роблять їх ідеальним «тригером». Для об'єктів, що вже перебувають у стані нестійкої рівноваги (критично напружені схили, зони розломів, борти кар'єрів), додаткове припливне зусилля стає «останньою краплею», що запускає незворотні руйнівні процеси.

Особливий інтерес становить вивчення негативного впливу припливних сил на специфічні поверхневі структури. У Києві — це лесові ґрунти дніпровських схилів, схильні до раптової втрати міцності при зміні вологості та мікродеформаціях. У Кривому Розі — це техногенно порушені масиви кристалічного щита [Pihulevskiy et al., 2021], де гравітаційний вплив накладається на колосальні внутрішні напруження, створені глибоким видобутком залізної руди. Моніторинг цих процесів дає змогу виявити кореляцію між фазами Місяця (сизигіями), конфігурацією планет і сплесками сейсмоакустичної емісії чи активізацією зсувів, що є критично важливим для

забезпечення безпеки інфраструктури та населення цих регіонів.

Територія специфічних поверхневих структур Києво-Печерської лаври (КПЛ) сформувалася на високих правобережних терасах Дніпра, складених потужними товщами лесових відкладів [Cherevko et al., 2025], які почали інтенсивно освоюватися ще в XI ст. Висока розчленованість рельєфу та наявність мережі давніх печер створили унікальну, але вразливу систему, де природні ерозійні процеси століттями посилювалися антропогенним тиском.

Особливу небезпеку становить ділянка навколо Великої лаврської дзвіниці, де під впливом техногенних чинників та вимивання ґрунтів утворилися значні об'ємні зони розущільнених ґрунтів, ймовірно навіть з пустотами, що безпосередньо загрожує стійкості фундаментів масивної споруди. Наявність таких незаповнених об'ємів під поверхнею робить структуру критично чутливою до найменших динамічних коливань. Саме в таких умовах циклічні гравітаційні деформації можуть призвести до раптового просідання або обвалу пустот.

У Кривому Розі ділянка території специфічної поверхневої структури розташована в межах найстарішої частини залізничного басейну, де промисловий видобуток почався наприкінці XIX ст. Ця зона безпосередньо прилягає до місць залягання пластів криворізької серії, де за десятиліття активної експлуатації надр утворилися глибокі шахтні поля та зони зсувних деформацій кристалічного масиву. Калінінський кар'єр, один із залізничних кар'єрів Криворізького залізничного басейну (Кривбасу), розташований у північній частині міста, поблизу мікрорайону Інгулець, що також входить до структури найстарішої частини залізничного басейну. Цей кар'єр є частиною багатой історії гірничодобувної промисловості регіону, яка бере свій початок у другій половині XIX ст. Хоча конкретні історичні дані про Калінінський кар'єр обмежені, він, ймовірно, був відкритий у період інтенсивного розвитку промисловості в Кривому

Розі, коли місто перетворювалося на великий центр видобутку та переробки залізної руди. У той час у регіоні активно розроблялися нові родовища, будувалися гірничозбагачувальні комбінати та інша інфраструктура, необхідна для забезпечення потреб металургійної промисловості. Калінінський кар'єр, як і інші кар'єри Кривбасу, має значний вплив на ландшафт і екологію регіону. Його масштаби та глибина свідчать про інтенсивність видобутку залізної руди, яка відіграє ключову роль в економіці міста та України загалом.

Обидві представлені проблемні локації (КПЛ та Калінінський кар'єр) мають тривалу історію накопичення внутрішніх напружень: у Києві — через зміну гідрогеологічного режиму схилів, у Кривому Розі — через порушення цілісності надр, що робить їх ідеальними об'єктами для вивчення гравітаційного впливу. Для дослідження цих процесів необхідне спеціальне обладнання, а також ефективні методи аналізу даних, які повинні відповідати поставленій меті. Оптимальним інструментарієм для забезпечення таких досліджень є лазерні нахиломіри або лазерні інклінометри. Ці прилади дають змогу отримувати прецизійні дані в широкому динамічному діапазоні частот — від 0 до 100 Гц для фіксування як повільних припливних деформацій, так і високочастотних мікросейсмічних відгуків масиву.

Методологія обробки отриманих сигналів базується на спектральному аналізі та виділенні гармонік, що збігаються з теоретичними періодами місячно-сонячних припливів. Використання лазерної інклінометрії в поєднанні з алгоритмами цифрової фільтрації методом усереднення дає змогу відокремити корисний гравітаційний сигнал від техногенного шуму міста чи промислової зони. Це забезпечує високу достовірність оцінки того, як саме космічні чинники впливають на динаміку тріщиноутворення в стінах історичних споруд та на стійкість бортів кар'єрів.

Оцінювання гравітаційного впливу на стан об'єктів дослідження. Нестандартна вертикальна орієнтація Великої лаврської

дзвіниці КПЛ з нахилом від вертикальної осі на 62 см (рис. 1) викликає низку тризовжних питань, оскільки зафіксоване достатньо давно значення кутового відхилення від строго вертикальної осі є стабільним і не залежить від багатьох зовнішніх факторів — просідання ґрунту навколо, проривів підземних трубопроводів і виникнення дестабілізації опорної області під впливом цих факторів. Для забезпечення визначення реальних значень куту і величини нахилу Великої лаврської дзвіниці КПЛ в її центральній частині на першому поверсі було встановлено лазерний інклінометр ІГН НАН України, технічний опис та паспорт якого представлено на вебпосиланні [Паспорт..., 2024]. На цей лазерний інклінометр, відкалібрований у Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, отримано сертифікат ДП «УКРМЕТ-РТЕСТСТАНДРТ» № UA/23/241129/002485 [Сертифікат..., 2026]. Чутливість лазерних вимірювачів зміщення оптимально налаштована саме під зазначену мету.

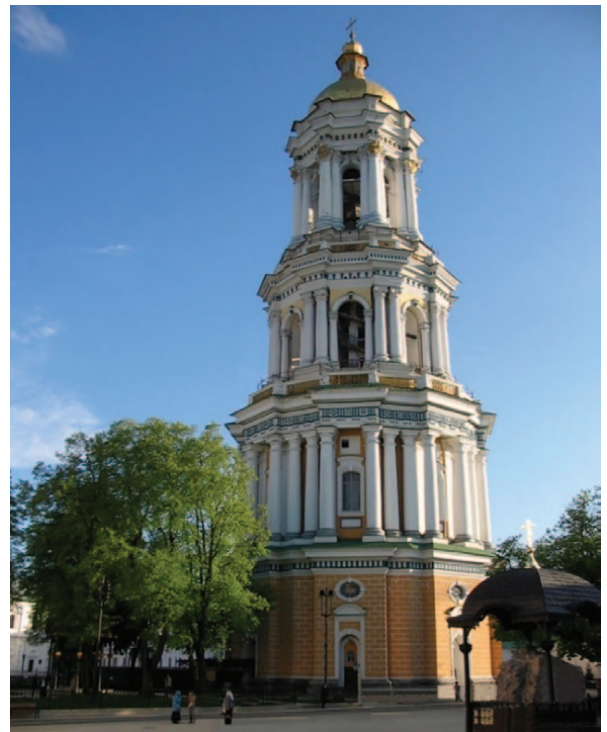


Рис. 1. Велика дзвіниця Києво-Печерської Лаври з нахилом від вертикальної осі на 62 см.

Fig. 1. The Great Bell Tower of the Kyiv Pechersk Lavra with a tilt from the vertical axis of 62 cm.

Наступним за рівнем небезпеки явищем є утворення тріщин на практично всіх історичних будівлях КПЛ. Найбільш значні за розмірами тріщини сформувалися давно і існують понад 80 років у конструктивних елементах (несучих стінах) корпусу № 4 (рис. 2). Попередній аналіз нестандартних причин їх появи наведено в публікаціях [Chalyi et al., 2023; Bugai et al., 2023], де показано, що часове розподілення кількості тріщин має чіткий зв'язок із фазами Місяця та Сонця. Для отримання додаткових, статистично значущих доказів впливу місячно-сонячних припливів на процеси утворення тріщин у стінах історичних споруд, а саме на стан Великої лаврської дзвіниці КПЛ у її центральній частині, встановлено сертифікований 3D лазерний інклінометр, виготовлений ТОВ «РОДЕН». Для вивчення властивостей цього процесу розглянуто загальні кутові та



Рис. 2. Тріщини на верхній частині стіни корпусу № 4, який розташований зліва від Великої лаврської дзвіниці.

Fig. 2. Cracks on the upper part of the wall of building No. 4 which is located to the left of the Great Lavra Bell Tower.

радіальні значення нахилу споруди, що дає змогу відобразити напрямок і величину нахилу Великої лаврської дзвіниці КПЛ протягом періоду спостережень (рис. 3).

При розгляді напрямків кутів та амплітуд зміщень, представлених на рис. 3, видно, що домінує один із базових напрямків із кутом приблизно 225° — 235° , який чітко корелює з вертикальними положеннями Сонця та Місяця [Sun Position..., 2026; Moon Position..., 2026]. На міжнародних динамічних мапах можна побачити, що домінуючою проекцією траєкторій руху Місяця та Сонця на поверхню Землі є саме напрямок на південь відносно лінії екватора. Повна проекція руху Землі відносно Місяця та Сонця на мапах стосовно точки розташування лазерного інклінометра показує, що домінують кути від 45° до 285° при різних фазах космічних об'єктів.

Після завершення проекту НФДУ «Комплексне дослідження геоecологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Кисво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій» [Бугай та ін., 2024] було прийнято рішення встановити подібну модель лазерного інклінометра (виготовлену на базі технічних параметрів первинної) за адресою: м. Кривий Ріг, вул. Геологічна, 2. Проведення цих робіт було зумовлене тим, що у багатьох будинках Кривого Рогу, розташованих поблизу кар'єрів і районів старих і неглибоких шахт, спостерігаються аналогічні проблеми — тріщини у стінах, значна деформація трубопроводів і сповзання верхніх частин покриття будинків. Прикладами є кілька будинків у районі вул. Геологічної, де зафіксовані суттєві пошкодження внутрішніх частин та наявні значні зовнішні тріщини (рис. 4, 5).

Масове виникнення тріщин у житлових і промислових будівлях пов'язано з неоднорідністю та динамічною деформацією геологічного середовища як навколо них, так і під ними. Виникнення значної неоднорідності середовища, ймовірно, зумовлені як порушенням стану стабільності специфічних геологічних структур, наслідками влаштування та експлуатації

шахт і кар'єрів, так і прискоренням зміни їх природного стану через глобальні зміни клімату.

Для оцінювання рівня небезпеки динаміки сповзання ґрунту в районі точки спостережень розглянемо записи першого варіанта лазерного інклінометра, який було

встановлено у будинку на вул. Геологічній. На рис. 6 представлено значення напрямків кута і амплітуди нахилу. Фіксуються три групи домінуючих напрямків та амплітуд нахилів, які можна класифікувати за трьома категоріями — циклічні, перехідні і лінійно направлені. За первинною візу-

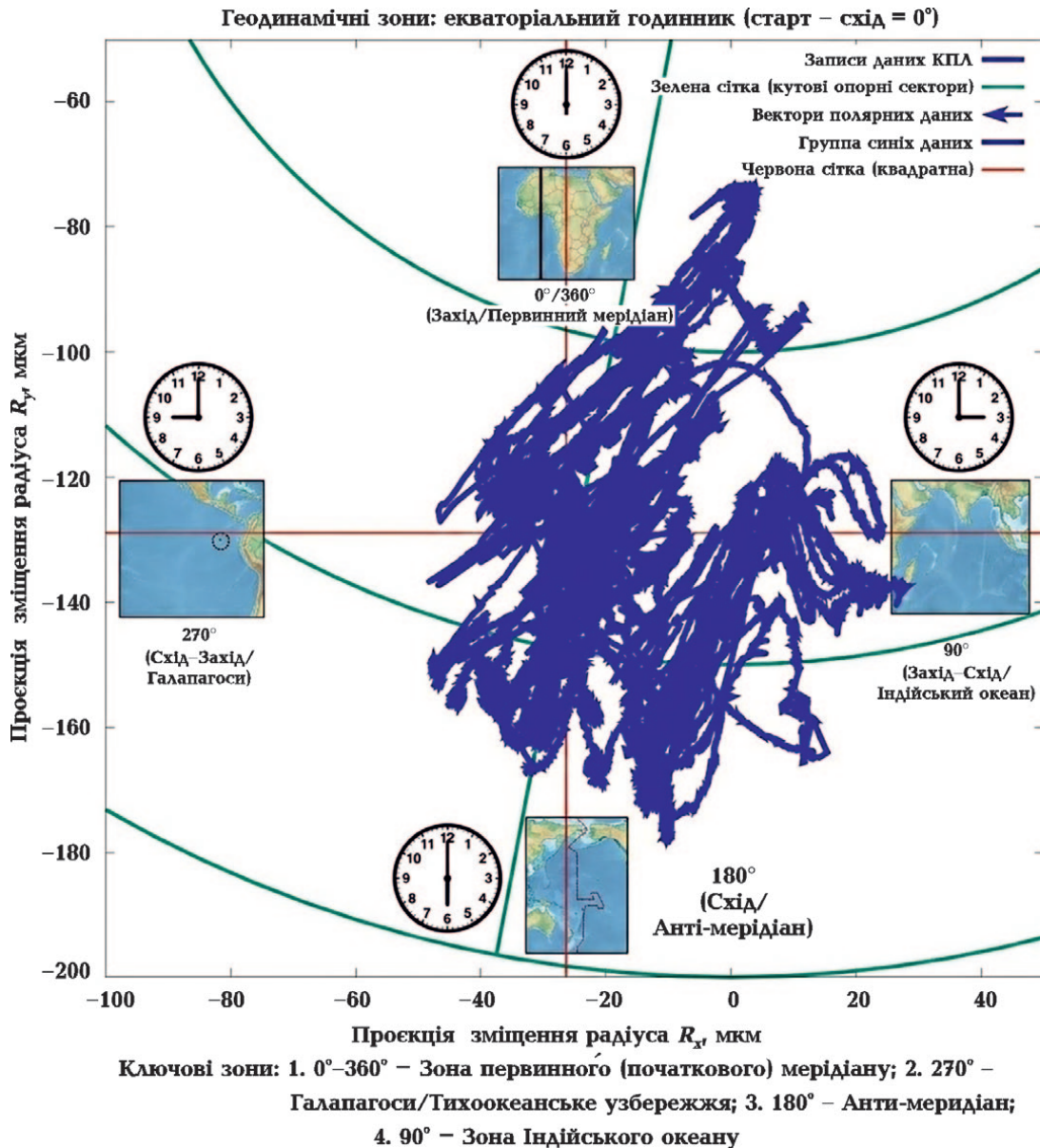


Рис. 3. Експериментальні записи проєкцій зміщень нижньої частини Великої лаврської дзвіниці у системі координат «схід—захід» — «південь—північ» EW-SN. По горизонтальній та вертикальній осях наведено компоненти зміщень R_x та R_y (мкм). Концентричні кола відповідають модулям вектора зміщення 200, 400 та 600 мкм. Напрямок зміщення визначається кутом між вектором зміщення та віссю координат.

Fig. 3. Experimental records of displacement projections of the lower part of the Great Lavra Bell Tower in the East–West–South–North coordinate system. The horizontal and vertical axes show the displacement components R_x and R_y (μm). The concentric circles correspond to displacement vector modules of 200, 400 and 600 μm . The displacement direction is determined by the angle between the displacement vector and the coordinate axis.



Рис. 4. Значна зовнішня тріщина на стіні житлового будинку по вул. Геологічній, м. Кривий Ріг, що знаходиться у зоні спуску до непрацюючого кар'єру ім. Калініна.

Fig. 4. A significant external crack on the wall of a residential building on Geological Street, Kryvyi Rih, located in the area of the descent to the inactive Kalinin quarry.



Рис. 5. Значні тріщини у внутрішній частині технічного двоповерхового будинку на вул. Геологічній.

Fig. 5. Significant cracks in the interior of a two-story technical building on Geological Street.

альною аналітикою даних можна побачити, що перший варіант циклічних нахилів на різні кути від 0° до 360° є домінуючим (циклічні лінії по колу).

Другим важливим варіантом аналізу представлених даних є те, що з центральної області циклічних нахилів є аномальні викиди лінійно направлених кутових напрямків, які іноді значно виходять із зони циклічних рухів (фрагменти, що виходять за межі циклічних ліній кола). Для оцінювання рівня небезпеки через наявність або відсутність значних зміщень у двох зонах фіксації періодичних горизонтальних деформацій земної поверхні наступним кроком є проведення порівняльного аналізу відносних значень кутових амплітуд для двох точок досліджень — у Кривому Розі та Києві (рис. 7, 8).

Отримані за три місяці значення зміщень у двох різних точках досліджень показують, що їх амплітуди і напрямки суттєво відрізняються: амплітуда зміщення Великої лаврської дзвіниці КПЛ у Києві майже в 10 разів менша, ніж амплітуда зміщення точки досліджень у м. Кривий Ріг. Чинники процесів потребують додаткових досліджень.

Результати загального аналізу виявлених проблем за даними, відображеними на рис. 3 і 6, показують, що в районі розташування лазерного інклінометра у Великій лаврській дзвіниці КПЛ домінують лінійно направлені напрямки нахилів (див. рис. 3), а в районі розташування лазерного інклінометра на вул. Геологічній — циклічні напрямки нахилів (див. рис. 6). Для встановлення причин виникнення вказаних кутових аномалій з отриманням достовірних результатів необхідно розглянути результати побудови реальних поверхневих геологічних структур в місцях розташування приладів за точними топографічними даними. Використання таких підходів дає змогу чітко ідентифікувати зони максимальних градієнтів висот, що збігаються з бортами діючих кар'єрів і самого геологічного середовища (рис. 9, 10).

Аналіз геоморфології поверхні необхідний для подальшого врахування топо-

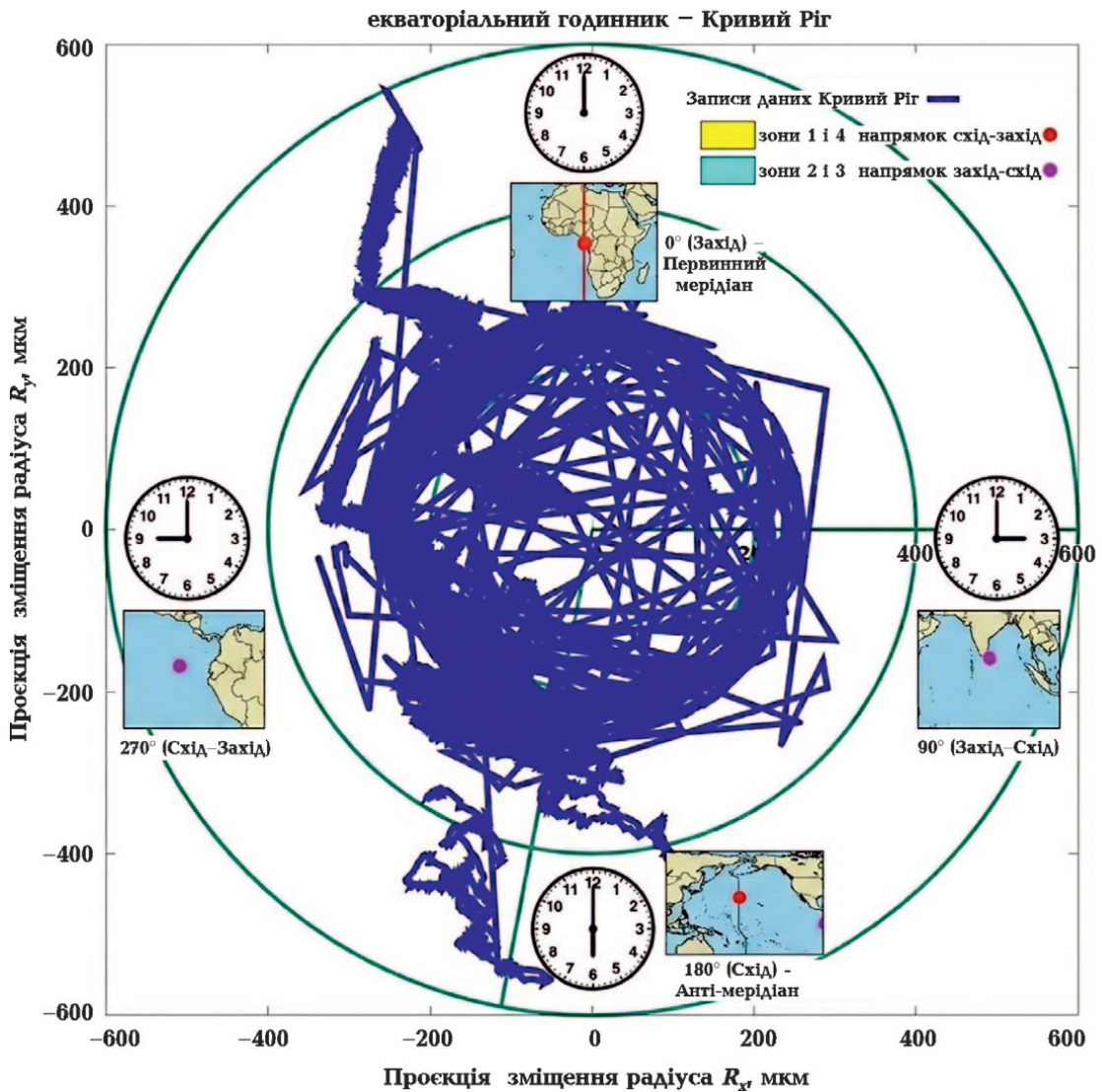


Рис. 6. Експериментальні записи проєкцій зміщень у точці спостережень на вул. Геологічній, м. Кривий Ріг. По горизонтальній та вертикальній осях наведено компоненти зміщень R_x та R_y (мкм). Концентричні кола відповідають модулям вектора зміщення 200, 400 та 600 мкм. Напрямок зміщення визначається кутом між вектором зміщення та віссю координат.

Fig. 6. Experimental records of displacement projections at the observation point on Geological Street, Kryvyi Rih. The horizontal and vertical axes show the displacement components R_x and R_y (μm). The concentric circles correspond to displacement vector modules of 200, 400 and 600 μm . The direction of displacement is determined by the angle between the displacement vector and the coordinate axis.

графічного впливу на покази лазерних інклінометрів та коректної інтерпретації припливних деформацій.

За аналізом ізоліній висот на території КПЛ (рис. 9) встановлено, що основний градієнт вертикальних неоднорідностей рельєфу поширюється у напрямку із заходу на схід. Вісь максимального нахилу поверхні має кут орієнтації приблиз-

но 15° — 20° відносно горизонтальної осі захід—схід (у бік русла р. Дніпро, синя стрілка на рис. 9). Базова неоднорідність поверхневої структури геологічного середовища в районі розташування приладу (3D LASER, абсолютна відмітка 188,0 м) характеризується високою щільністю ізоліній, що свідчить про значну крутизну схилу безпосередньо поблизу точки моніторин-

гу. Зона розташування інклінометра знаходиться на перехідній ділянці між відносно стабільним плато (абсолютні відмітки 188—190 м) і стрімким ерозійним схилом, де висоти різко знижуються до 115—120 м. Геоморфологічні умови ділянки зумовлюють перерозподіл локальних гравітаційних напружень, оскільки точка спостереження фактично знаходиться на межі значного «дефіциту маси», що означає відсутність необхідної кількості маси для компенсації горизонтального зсуву саме наявністю вертикального гравітаційного притягання до центру ядра Землі у західній частині схилу. Це необхідно враховувати при виділенні корисного сигналу припливних деформацій на фоні топографічних ефектів з даних записів лазерного інклінометра, який працював у Великій лаврській дзвіниці КПЛ (м. Київ).

Для опису схожої ситуації по вул. Геологічній у Кривому Розі потрібно змінити акценти, оскільки геоморфологія там доко-

рінно відрізняється від ситуації зі структурою градієнтів поверхні на території КПЛ. Якщо в Лаврі ми бачимо природний ерозійний схил, то в Кривому Розі рельєф має яскраво виражений техногенний (антропогенний) характер, пов'язаний з гірничодобувною діяльністю. Аналіз мапи ізоліній на рис. 10 вказує на складну геоморфологічну структуру геологічного середовища, яка сформувалася під впливом інтенсивного техногенного втручання. На відміну від природних схилів існуючі градієнти висот характеризуються різкою зміною векторів нахилу та наявністю замкнених від'ємних (кар'єри) і додатних (відвали) форм рельєфу. Висока щільність ізоліній на схемі відображає борти кар'єрних виїмок, де перепад висот може сягати кількох сотень метрів на відносно коротких горизонтальних відстанях. Така концентрація мас та їх техногенне переміщення створюють локальні збурення в просторовому розподілі гравітаційного поля на

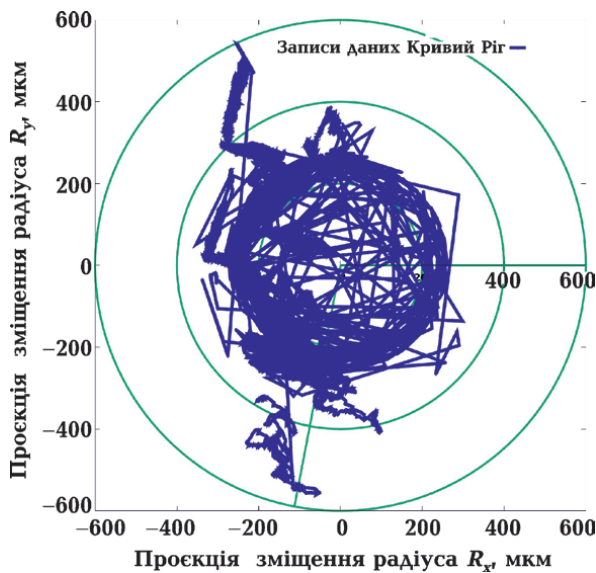


Рис. 7. Експериментальні записи проекцій зміщень у точці спостережень на вул. Геологічній. По горизонтальній та вертикальній осях наведено компоненти зміщень R_x та R_y (мкм). Циклічне зміщення на 1,2 мм за три місяці.

Fig. 7. Experimental records of displacement projections at the observation point on Geological Street. The horizontal and vertical axes show the displacement components R_x and R_y (μm). Cyclic displacement of 1.2 mm in three months.

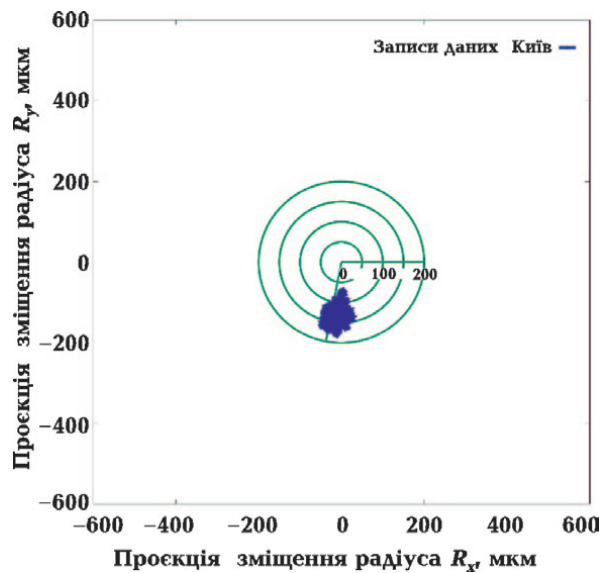


Рис. 8. Експериментальні записи проекцій зміщень нижньої частини Великої лаврської дзвіниці, м. Київ. По горизонтальній та вертикальній осях наведено компоненти зміщень R_x та R_y (мкм). Циклічне зміщення на 0,15 мм за три місяці.

Fig. 8. Experimental records of displacement projections of the lower part of the Great Lavra Bell Tower, Kyiv. The horizontal and vertical axes show the displacement components R_x and R_y (μm). Cyclic displacement of 0.15 mm in three months.

поверхні Землі, що суттєво впливає на фонові показники інклінометричних вимірювань. Підтвердження результатів щодо наявності значних перепадів і неоднорідностей градієнтів поверхневих структур можна спостерігати на горизонтальних розрізах, побудованих за супутниковими даними [Kril et al., 2024a; Мапа..., 2026a,б]. Аналіз проводився за лініями профілів, на яких безпосередньо розташовані лазерні інклінометри (рис. 11) у двох різних точках досліджень України.

Порівняльний аналіз вертикальних розрізів рельєфу, представлених на рис. 11, дає змогу деталізувати геоморфологічні особливості середовища в точках проведення моніторингу. Верхній профіль (Кривий Ріг) демонструє типовий техногенно трансформований рельєф з різкими перепадами висот. Характерною особливістю

є наявність крутих бортів кар'єрних виїмок і відвалів, що створює значну неоднорідність розподілу мас у безпосередній близькості до інклінометра. Такі градієнти зумовлюють високу чутливість приладу до локальних техногенних напружень. Нижній профіль (Київ, КПЛ) відображає природну структуру ерозійного схилу високого правого берега р. Дніпро. Профіль характеризується більш плавним, але постійним зниженням абсолютних відміток у східному напрямку. Точка розташування приладу знаходиться на перетині стабільної ділянки плато та активної зони схилу, що визначає специфіку гравітаційного відгуку на цій станції.

Таким чином, наявність чітко виражених вертикально-горизонтальних градієнтів середовища у безпосередній близькості до точок спостереження (див. рис. 11) вка-

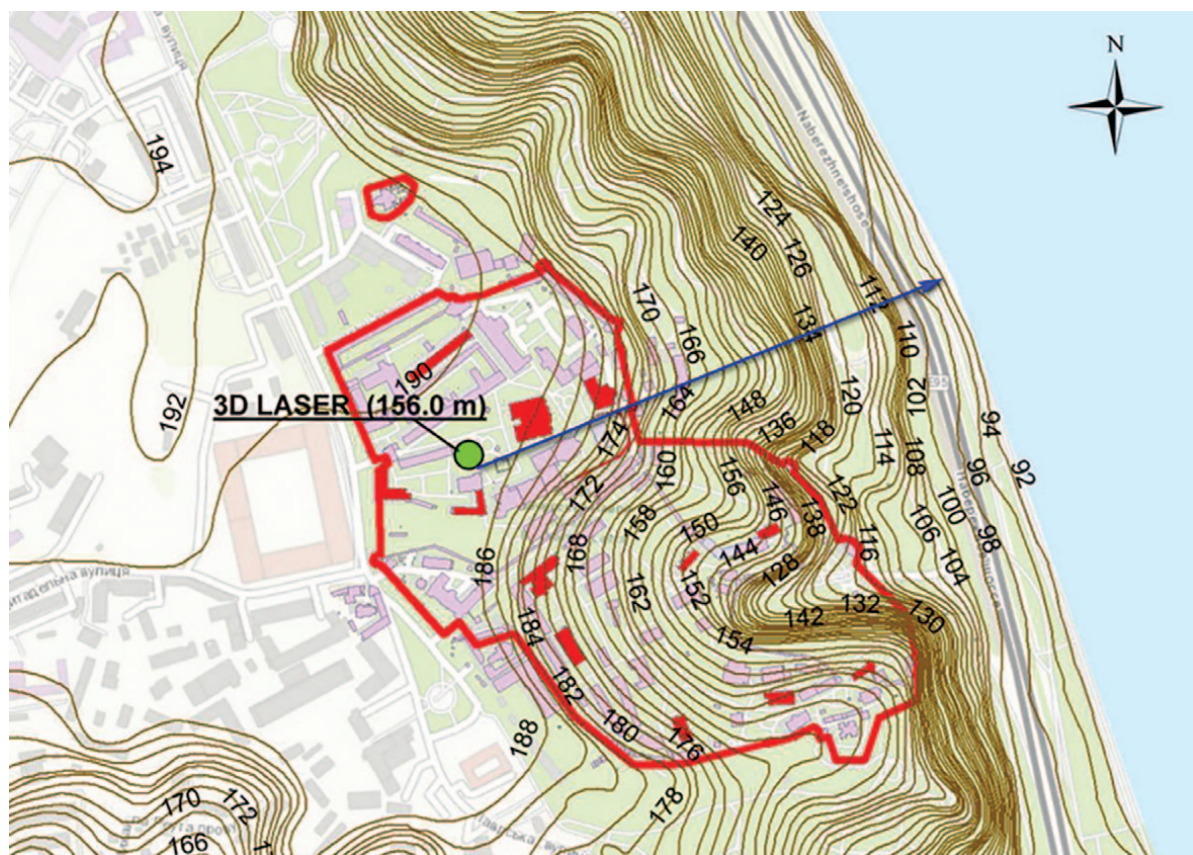


Рис. 9. Мапа ізоліній зони різних значень максимальних градієнтів висот на загальній території Києво-Печерської лаври та розташування лазерного інклінометра.

Fig. 9. Map of contour lines of the zone of different values of maximum elevation gradients in the general area of the Kyiv Pechersk Lavra and the location of the laser inclinometer.



Рис. 10. Мапа ізоліній зони різних значень максимальних градієнтів висот у м. Кривий Ріг та розташування лазерного інклінометра.

Fig. 10. Map of contour lines of the zone of different values of maximum elevation gradients in the city of Kryvyi Rih and the location of the laser inclinometer.

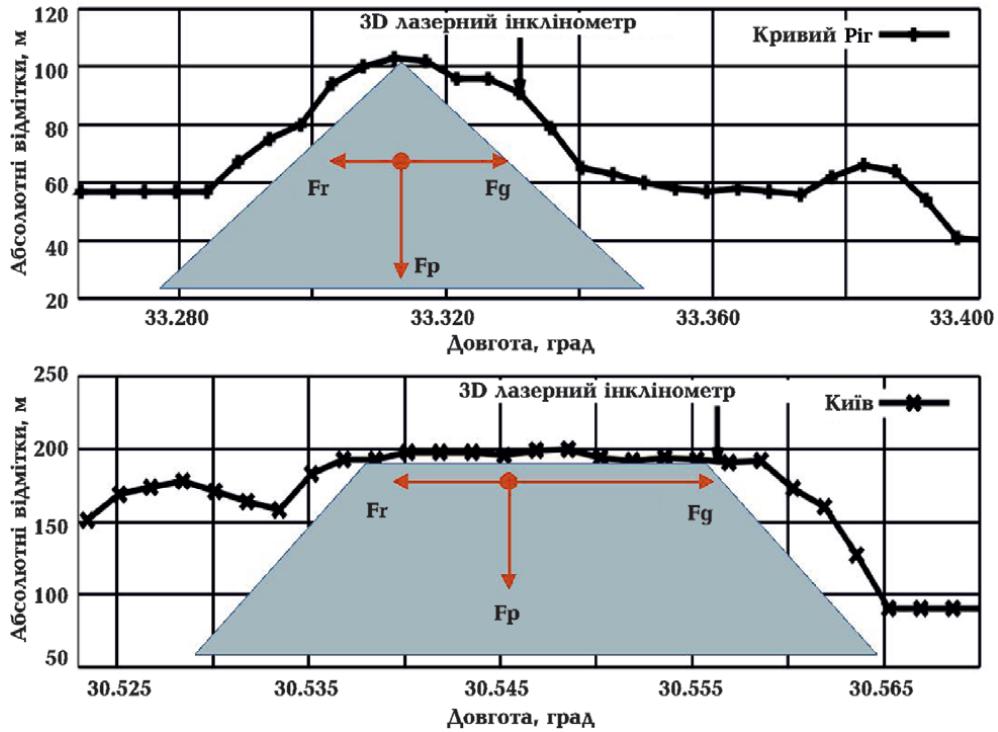


Рис. 11. Топографічні профілі земної поверхні в районах розташування лазерних інклінометрів: м. Кривий Ріг (верхній профіль) та м. Київ (нижній профіль). По осі X відкладено географічну довготу (градуси), по осі Y — абсолютні відмітки земної поверхні (м).

Fig. 11. Topographic profiles of the earth's surface in the areas where laser inclinometers are located: Kryvyi Rih (upper profile) and Kyiv (lower profile). The X axis shows the geographical longitude (degrees), and the Y axis shows the absolute elevation of the earth's surface (m).

зує на нерівномірний розподіл мас верхніх шарів земної кори в обох досліджуваних районах. Це дає змогу стверджувати, що зафіксовані лазерними інклінометрами варіації нахилів містять вагому морфометричну складову, яка має бути врахована при подальшому моделюванні напружено-деформованого стану геологічного середовища.

Підтвердженням наявності нестабільної геологічної будови частини території КПЛ є експериментальні дослідження методом георадарної розвідки канд. фіз.-мат. С.П. Левашова [Левашов, 2020], структуру якої представлено на рис. 12. Подібні дані отримані дослідниками при моделюванні нестабільних ділянок на території КПЛ [Kril et al., 2024б].

Статистичний аналіз фазових зміщень за даними лазерної інклінометрії. Оптимальним доказом наявності або відсутності зміщень є проведення аналітики записів лазерних інклінометрів, які були розташовані в проблемних точках двох об'єктів дослідження — КПЛ та Кривий Ріг. Результати статистичної обробки трьох компонент записів двох лазерних інклінометрів представлено на рис. 13 та 14 відповідно. Дослідження на території КПЛ проводяться постійно з грудня 2023 р. і до теперішнього часу (записи виконуються посекундно), на території Кривого Рогу — з квітня по грудень 2025 р. Записи обробляються за допомогою спеціального програмного забезпечення [Паспорт..., 2024].

Аналітика записів лазерних інкліно-

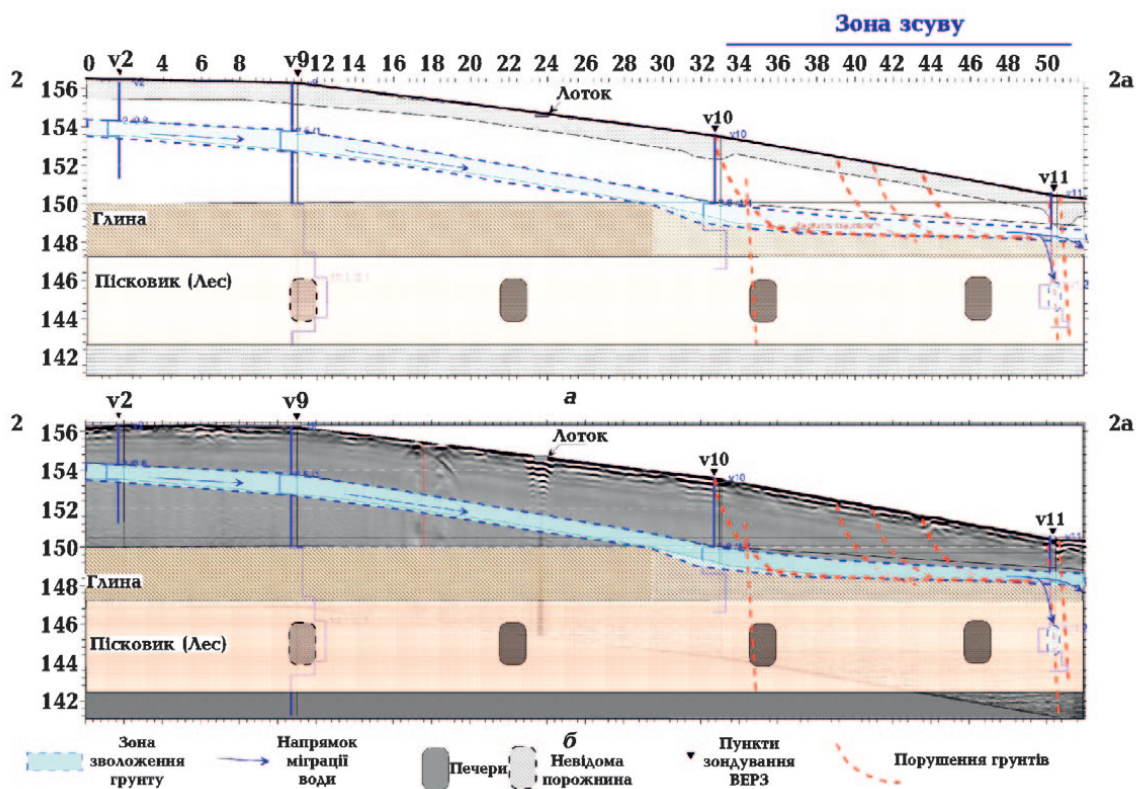


Рис. 12. Схематичний геолого-геофізичний розріз верхньої частини проблемної геологічної структури Києво-Печерської лаври. Зони порушення ґрунтів (сповзання) позначені червоними пунктирними лініями. Кольором виділено літологічні різновиди ґрунтів (насіпні, делювіальні, глини, пісковики, піски). По осі X відкладено відстань, м; по осі Y — абсолютні відмітки, м.

Fig. 12. Geological and geophysical section of the upper part of the problematic geological structure of the Kyiv Pechersk Lavra. Zones of soil disturbance (slip) are marked with red dotted lines. Lithological types of soils (loam, diluvial, clay, sandstone, sand) are highlighted in color. The distance is plotted on the X axis, m; the absolute elevations are plotted on the Y axis, m.

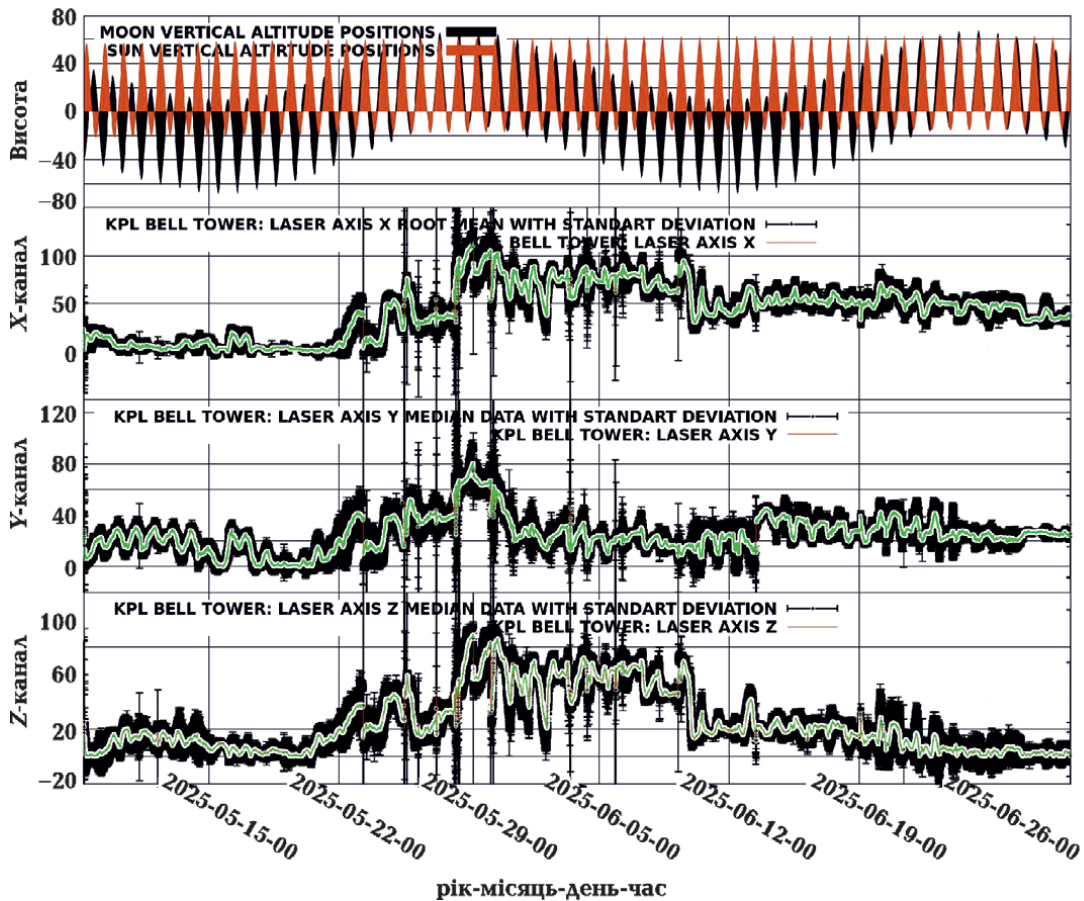


Рис. 13. Записи трьохкомпонентного лазерного інклінометра, розташованого у Великій лаврській дзвіниці, з фазами вертикального кута положення Місяця та Сонця зі статистичною обробкою за період з 15.05.2025 до 30.06.2025 р. Червоно-чорний графік — вертикальні кути положення Сонця і Місяця; зелені графіки — статистична обробка даних лазерного інклінометру по осях X, Y, Z (зверху вниз); вертикальні чорні лінії — відхилення від періодичних сигналів, спричинених рухом транспорту.

Fig. 13. Records of a three-component laser inclinometer, which is located in the Great Lavra Bell Tower, with phases of the vertical angle of the position of the Moon and the Sun with statistical processing (May 15 — June 30 2025). Red-black graph — vertical angles of the Sun and Moon; green graphs — results of statistical processing of the laser inclinometer data along the X, Y, Z axes (from top to bottom); black dashed lines — deviations from periodic signals caused by traffic.

метрів різними методами, зокрема і спектральний аналіз, показує наступне:

- зафіксовано деформацію поверхні Землі за всіма трьома компонентами X, Y та Z, період якої збігається з фазами вертикального кута положення Місяця та Сонця відносно поверхні Землі у двох точках досліджень одночасно;

- зафіксовано аномальне зменшення амплітуд деформацій поверхні Землі у точках спостережень за всіма трьома компонентами X, Y та Z перед землетрусом на Камчатці з магнітудою 8,8 [Massive..., 2026]

на записах інклінометра у м. Кривий Ріг;

- порівняльний аналіз відносних значень зміщення за кожним напрямком X, Y та Z у двох точках досліджень показує, що амплітуда зміщення Великої лаврської дзвіниці КПЛ у Києві майже в 10 разів менша, ніж амплітуда зміщення точки досліджень у м. Кривий Ріг;

- аналітика специфічної частини деформацій за трьома напрямками X, Y та Z для Великої лаврської дзвіниці КПЛ (див. рис. 13) показує наступне: у разі збігу фази Місяця та Сонця виникають значні

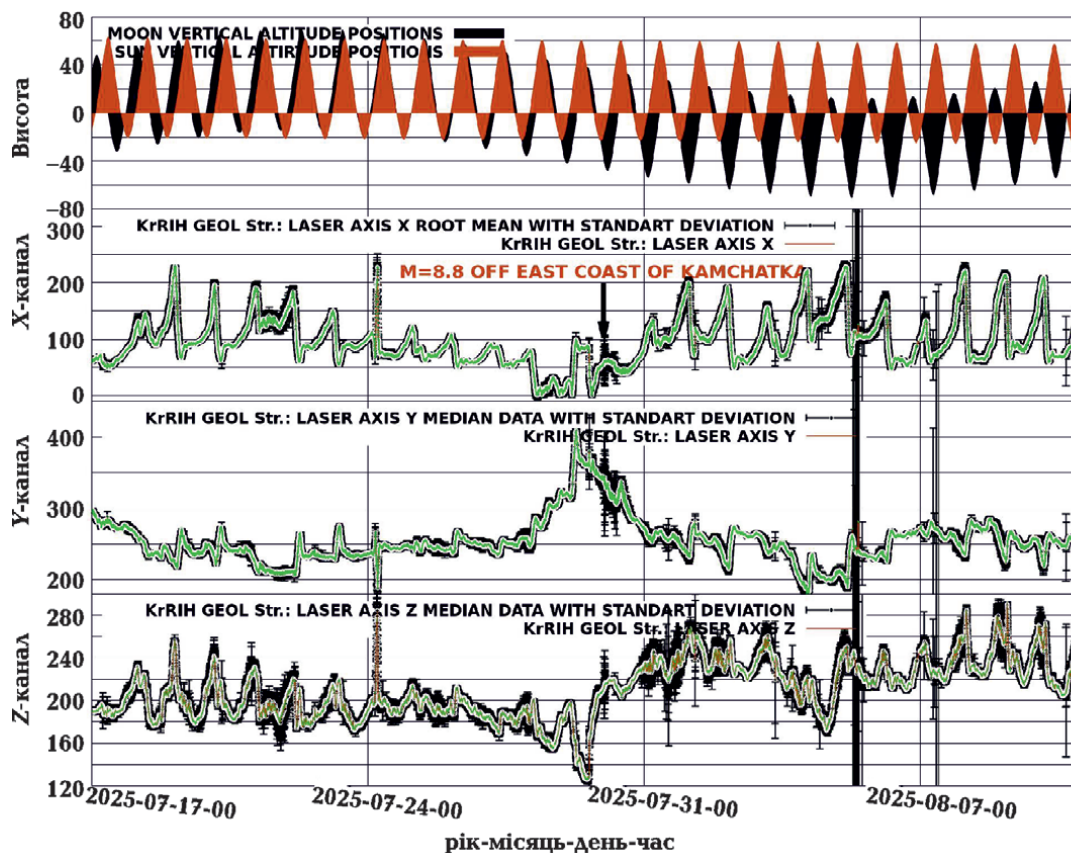


Рис. 14. Записи трьохкомпонентного лазерного інклінометра, розташованого на вул. Геологічній, 2, м. Кривий Ріг, з фазами вертикального кута положення Місяця та Сонця зі статистичною обробкою за період з 17.07.2025 до 17.08.2025 р. Червоно-чорний графік — вертикальні кути положення Сонця і Місяця; зелені графіки — статистична обробка даних лазерного інклінометру по осях X, Y, Z (зверху вниз); вертикальні чорні лінії — відхилення від періодичних сигналів, викликаних рухом транспорту.

Fig. 14. Records of a three-component laser inclinometer, which is located at 2 Geological Street in the city of Kryvyi Rih, with phases of the vertical angle of the position of the Moon and the Sun with statistical processing. Red-black graph — vertical angles of the Sun and Moon; green graphs — results of statistical processing of laser inclinometer data along the X, Y, Z axes (from top to bottom); black dashed lines — deviations from periodic signals caused by traffic.

деформації поверхні Землі, і під час цього процесу суттєво зростає кількість тріщин у розташованих поряд корпусах № 3 та 4 [Cherevko et al., 2025];

– спектральний аналіз експериментальних даних, отриманих з лазерних інклінометрів, показує, що основний період коливань, представлений на рис. 13 та 14, становить 89367,10 с ($\approx 24,82$ год), що близько відповідає добовим періодам руху Сонця і Місяця відносно точки спостереження. Відхилення від точної сонячної доби (24 год) становить приблизно 0,824 год (≈ 49 хв 27 с), зате майже повністю збігається з місячною добою (24 год 50 хв) [Ray, Erofeeva,

2014]. Різниця у 49—50 хв визначає припливи через обертання Землі відносно Місяця [Understanding..., 2026] і призводить до фазових зсувів у спостережуваному сигналі.

Висновки. Проведені дослідження із застосуванням сучасної лазерної технології у двох регіонах України свідчать, що порушення природної однорідності поверхневої структури Землі призводять до проявів геодинамічної нестабільності у формі зсувів або провалів. Зазначені деструктивні процеси мають тривалу історію формування, яка дотепер не вивчалась цими інструментальними методами. Проте інтен-

сифікація видобутку корисних копалин на сучасному етапі зумовлює розширення зон потенційної геодинамічної небезпеки. Порівняльний аналіз двох спостережних ділянок показав істотно вищий рівень загрози у м. Кривий Ріг, ніж на території КПЛ у м. Київ.

Аналіз даних лазерних інклінометрів за допомогою комплексу методів, зокрема спектрального аналізу, опосередковано підтверджує, що періоди деформації земної поверхні на досліджуваних ділянках синхронізуються зі змінами вертикальних кутів положення Місяця та Сонця. У ці фази фіксується інтенсивне утворення тріщин у прилеглих будівлях на території КПЛ. Результати спектрального аналізу вказують на те, що основний період коливань сигналу інклінометрів відповідає добовим циклам руху Місяця і зумовлює відповідні фазові зміщення сигналу.

Значні зміщення відбуваються внаслідок впливу трьох факторів — наявність динамічного горизонтального впливу гравітації на ґрунтовий масив, мінімізація вертикального гравітаційного притягання під ним та значна горизонтальна осциляція деформацій, пов'язаних з фаза-

ми Місяця. Активні деформації будинку у м. Кривий Ріг пов'язані з двома факторами: постійним сповзанням об'єктів забудови у кар'єр та періодично динамічним напруженням території від горизонтальної складової впливу гравітації. Структура і склад геологічного середовища цієї території також зазнають зовнішніх впливів гравітації у горизонтальному напрямку. Рівень небезпеки зміщення ґрунтового масиву на території КПЛ незначний.

Використання 3D лазерних інклінометрів є цілком виправданим для моніторингу геодинамічних процесів завдяки їх надзвичайно високій чутливості, стабільності та мінімальному температурному дрейфу. На відміну від традиційних приладів лазерні системи дають змогу надійно реєструвати як повільні припливні деформації (місячно-сонячні), так і мікросейсмічні відгуки ґрунтового масиву в умовах сильного техногенного шуму. Це робить їх одним з найбільш ефективних сучасних інструментів для ранньої діагностики нестабільності схилів, особливо на об'єктах культурної спадщини та в зонах техногенного порушення ґрунтів.

Список літератури

- Бугай Д.О., Кріль Т.В., Черевко І.А., Щербина С.В., Шехунова С.Б., Мостовий В.С. Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій». Грант за конкурсом НФДУ «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (2022.01/0209), 2024, 121 с.
- Довбнич М.М. Влияние вариаций ротационного режима Земли и лунно-солнечных приливов на напряженное состояние тектоносферы. *Доп. НАН України*. 2007. № 11. С. 105—112.
- Довбнич М.М., Солдатенко В.П. О вибрационном воздействии лунно-солнечных приливов на геодинамические процессы. *Доп. НАН України*. 2008. № 12. С. 96—100.
- Довбнич М.М., Солдатенко В.П. Разломно-блоковая модель и приливный триггерный механизм сейсмического процесса (на примере сейсмичности Крыма). *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 2. 140—146. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i2.2010.117564>.
- Левашов С.П. Геофізичні дослідження Близньопечерного пагорба з метою визначення чинників деформацій та перезволоження ґрунтового масиву у будівлях корпусів № 37, 38, 48 та № 41, 42, 43, підземних галереях Близніх печер: науково-технічний звіт. Київ, 2020, 54 с.
- Мапа супутникових значень висот поверхні землі по точним значенням координат для точки розташування лазерного інклінометра у м. Київ, (2026а). Режим доступу: <http://lavra.igs-nas.org.ua/GoogleMaps/KPL0/>.
- Мапа супутникових значень висот поверхні

- землі по точним значенням координат для точки розташування лазерного інклінометра у м. Кривий Ріг (2026б). Режим доступу: <http://lavra.igs-nas.org.ua/GoogleMaps/KrR00/>.
- Паспорт на лазерний інклінометр LIR01. (2024). Режим доступу: <http://lavra.igs-nas.org.ua/DOCS/ACCEL/PassportLaserInclinometerx005a.pdf>.
- Пигулевский П.И., Свистун В.К., Щербина С.В. О тектоническом строении, геодинамических и сейсмологических особенностях Кривбасса. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 17. С. 37—46.
- Сертифікат калібрування. (2026). Реєстраційний № UA/23/241129/002485. Режим доступу: <https://lavra.igs-nas.org.ua/DOCS/ACCEL/LaserTiltCertifx002a.pdf>.
- 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*, 16(2), 76—86. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.293237>.
- Chalyi, O., Feshchenko, A., & Shcherbyna, S. (2023). The cause of cracks on the walls of buildings in the Kyiv-Pechersk Lavra. *XVII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», 7—10 November 2023, Kyiv, Ukraine* (pp. 1—5).
- Cherevko, I., Kril, T., Mostovyy, V., & Shcherbyna, S. (2025). Structural health monitoring of heritage building under military actions. *International Journal of Conservation Science*, 16(4), 1755—1774. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.04.09>.
- Cochran, E.S., Vidale, J.E., & Tanaka, S. (2004). Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes. *Science*, 306(5699), 1164—1166. <https://doi.org/10.1126/science.1103961>.
- Heaton, T.H. (1982). Tidal triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(6A), 2181—2200. <https://doi.org/10.1785/BSSA07206A2181>.
- Kasahara, J. (2002). Tides, earthquakes, and volcanoes. *Science*, 297(5580), 348—349. <https://doi.org/10.1126/science.1074601>.
- Kechebour, B.E.L. (2015). Relation between Stability of Slope and the Urban Density: Case Study *Procedia Engineering*, 114, 824—831. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.034>.
- Kril, T.V., Cherevko, I.A., Shcherbyna, S.V., & Chalyi, O.O. (2024a). Modern risk assessment of the influences of natural and military man-made factors on the state of the historical buildings of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(5), 93—105. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.309056>.
- Kril, T., Cherevko, I. & Shekhunova, S.A (2024b). Ranking Analysis of Geological and Engineering Factors of Historical Monuments' Stability Response: A Case Study of Kyiv-Pechersk Lavra, Ukraine. *Buildings*, 14(10), 3152. <https://doi.org/10.3390/buildings14103152>.
- Lu, Z., Yi, H., & Wen, L. (2018). Loading-induced Earth's stress change over time. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 4285—4306. <https://doi.org/10.1029/2017JB015243>.
- Massive earthquake of magnitude 8.8 strikes Russia's Far East, biggest since 2011; details inside. (2026). Retrieved from https://economictimes.indiatimes.com/news/international/us/massive-earthquake-of-magnitude-8-7-strikes-russia-far-east-biggest-since-2011-details-inside/articleshow/122986295.cms#google_vignette.
- Métivier, L., de Viron, O., Conrad, C.P., Renault, S., Diament, M., & Patau, G. (2009). Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3-4), 370—375. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>.
- Moon Position Calculation on Google Map. (2026). Retrieved from <https://www.mooncalc.org/#/50.4691,30.3578,3/2026.04.25/20:22/1/1>.
- Pihulevskyi, P.G., Anisimova, L.B., Kalinichenko, O.O., Panteleeva, N.B., & Hanchuk, O.V. (2021). Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018>.
- Ray, R.D., & Erofeeva, S.Y. (2014). Long-period tidal variations in the length of day. *Journal of Geo-*

physical Research: Solid Earth, 119(2), 1498—1509. <https://doi.org/10.1002/2013JB010830>.

Retrieved from <https://explaining-science.org/2024/07/18/understanding-solar-day-length-variation/>

Sun Position Calculation on the Google Maps. (2026). Retrieved from <https://www.suncalc.org/#/50.469,30.358,5/2026.04.25/12:55/1/1>.

Wilcock, W.S. (2001). Tidal triggering of micro-earthquakes on the Juan de Fuca Ridge. *Geophysical Research Letters*, 28(20), 3999—4002. <https://doi.org/10.1029/2001GL013370>.

Understanding Solar Day Length Variation. (2026).

Monitoring and assessment of earth surface deformation due to the gravitative influence of the Moon and the Sun in geodynamically different zones of Kyiv and Kryvyi Rih

S.V. Shcherbyna¹, I.A. Cherevko², P.G. Pigulevsky¹, T.V. Kril³, O.O. Kalinichenko¹, A.I. Feshchenko¹, A.O. Romanenko⁴, O.D. Romanchenko², O.O. Chaly¹, 2026

¹S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National Reserve «Kyiv-Pechersk Lavra», Kyiv, Ukraine

³Institute of Geological Sciences of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

Human activities such as mineral extraction in the Kryvyi Rih region, have significantly altered the geological environment, affecting soil stability and creating additional risks for buildings, infrastructure, and urban facilities. A comparable process of environmental destabilization occurred much earlier in the Kyiv Pechersk Lavra area, where historical architectural structures and cultural monuments were also influenced by changes in the geological environment. Although these processes occurred in different centuries and were driven by distinct historical and economic factors, their consequences exhibit similar patterns. In both regions, cracks of varying severity, localized ground subsidence, and gradual displacement of buildings toward zones containing underground cavities—both natural and man-made—have been documented.

This study employs high-precision laser inclinometers of a Ukrainian design which detect small angular deformations of the ground surface and allow the analysis of factors contributing to slope instability and soil movement in areas with pronounced surface gradients and complex morphology.

Two identical laser inclinometers were installed for experimental monitoring: one in Kyiv and one in Kryvyi Rih. One instrument is certified by the State Enterprise «UKRMETRT-ESTSTANDARD» and meets modern national standards of accuracy, providing reliable data on soil displacement. Results indicate that lunar—solar tidal forces may influence the stability of shallow soil layers, particularly in regions with significant surface gradients and subsurface voids.

These findings demonstrate the considerable potential of laser inclinometer monitoring for investigating geodynamic processes, assessing deformation risks, predicting hazardous ground movements, and improving urban safety in areas with complex surface morphology and underground cavities.

Key words: laser inclinometer monitoring, lunar-solar tidal forces, ground deformation, slope stability, underground cavities, geodynamic hazards, urban geophysics, Kyiv Pechersk Lavra, Kryvyi Rih.

References

- Bugai, D.O., Kril, T.V., Cherevko, I.A., Shcherbyna, S.V., Shekhunova, S.B., & Mostovy, V.S. (2024). Comprehensive study of the geocological state of preservation of historical and cultural heritage sites of the National Reserve «Kyiv-Pechersk Lavra» in conditions of military operations. Grant under the competition of the National Research University of Ukraine «Science for the reconstruction of Ukraine in the war and post-war periods» (2022.01/0209), 121 p. (in Ukrainian).
- Dovbnych, M.M. (2007). Influence of variations in the Earth's rotational regime and lunar-solar tides on the stress state of the tectonosphere. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (11), 105—112 (in Russian).
- Dovbnych, M.M., & Soldatenko, V.P. (2008). On-the-vibrational effect of lunar-solar tides on geodynamic processes. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (12), 96—100 (in Russian).
- Dovbnych, M.M., & Soldatenko, V.P. (2010). The fault-block model and the tidal trigger mechanism of the seismic process (for example, the seismicity of the Crimea). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 32(2), 140—146. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i2.2010.11756.4> (in Russian).
- Levashov, S.P. (2020). Geophysical studies of the Blizhnepecherny hill in order to determine the factors of deformation and water logging of the soil massif in buildings No. 37, 38, 48 and No. 41, 42, 43, underground galleries of the Blyzhnikh Caves: scientific and technical report. Kyiv, 54 p. (in Ukrainian).
- Map of satellite values of earth's surface heights according to exact coordinate values for the location of the laser inclinometer in Kyiv. (2026a). Retrieved from <http://lavra.igs-nas.org.ua/GoogleMaps/KPL0/> (in Ukrainian).
- Map of satellite values of earth's surface heights according to exact coordinate values for the location of the laser inclinometer in Kryvyi Rih. (2026b). Retrieved from <http://lavra.igs-nas.org.ua/GoogleMaps/KrR00/> (in Ukrainian).
- Passport for laser inclinometer LIR01 (2024). Retrieved from <http://lavra.igs-nas.org.ua/DOCS/ACCEL/PassportLaserInclinometerx005a.pdf>.
- Pigulevsky, P.I., Svistun, V.K., & Shcherbina, S.V. (2013). About tectonic structure, geodynamic and seismological features of the Krivoy Rog iron ore basin. *Ecology and Nature Conservation*, (17), 37—46.
- Calibration certificate. (2026). Registration No. UA/23/241129/002485. Retrieved from <https://lavra.igs-nas.org.ua/DOCS/ACCEL/LaserTiltCertifx002a.pdf>.
- Bugai, D.O., Shcherbyna, 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*, 16(2), 76—86. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.293237>.
- Chalyi, O., Feshchenko, A., & Shcherbyna, S. (2023). The cause of cracks on the walls of buildings in the Kyiv-Pechersk Lavra. *XVII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*, 7—10 November 2023, Kyiv, Ukraine (pp. 1—5).
- Cherevko, I., Kril, T., Mostovyy, V., & Shcherbyna, S. (2025). Structural health monitoring of heritage building under military actions. *International Journal of Conservation Science*, 16(4), 1755—1774. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.04.09>.
- Cochran, E.S., Vidale, J.E., & Tanaka, S. (2004). Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes. *Science*, 306(5699), 1164—1166. <https://doi.org/10.1126/science.1103961>.
- Heaton, T.H. (1982). Tidal triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(6A), 2181—2200. <https://doi.org/10.1785/BSSA07206A2181>.
- Kasahara, J. (2002). Tides, earthquakes, and volcanoes. *Science*, 297(5580), 348—349. <https://doi.org/10.1126/science.1074601>.
- Kechebour, B.E.L. (2015). Relation between Stability of Slope and the Urban Density: Case Study *Procedia Engineering*, 114, 824—831. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.034>.

- Kril, T.V., Cherevko, I.A., Shcherbyna, S.V., & Chalyi, O.O. (2024a). Modern risk assessment of the influences of natural and military man-made factors on the state of the historical buildings of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(5), 93—105. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.309056>.
- Kril, T., Cherevko, I. & Shekhunova, S.A (2024b). Ranking Analysis of Geological and Engineering Factors of Historical Monuments' Stability Response: A Case Study of Kyiv-Pechersk Lavra, Ukraine. *Buildings*, 14(10), 3152. <https://doi.org/10.3390/buildings14103152>.
- Lu, Z., Yi, H., & Wen, L. (2018). Loading-induced Earth's stress change over time. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 4285—4306. <https://doi.org/10.1029/2017JB015243>.
- Massive earthquake of magnitude 8.8 strikes Russia's Far East, biggest since 2011; details inside. (2026). Retrieved from https://economictimes.indiatimes.com/news/international/us/massive-earthquake-of-magnitude-8-7-strikes-russias-far-east-biggest-since-2011-details-inside/articleshow/122986295.cms#google_vignette.
- Métivier, L., de Viron, O., Conrad, C.P., Renault, S., Diament, M., & Patau, G. (2009). Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3-4), 370—375. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>.
- Moon Position Calculation on Google Map. (2026). Retrieved from <https://www.mooncalc.org/#/50.4691,30.3578,3/2026.04.25/20:22/1/1>.
- Pihulevskyi, P.G., Anisimova, L.B., Kalinichenko, O.O., Panteleeva, N.B., & Hanchuk, O.V. (2021). Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018>.
- Ray, R.D., & Erofeeva, S.Y. (2014). Long-period tidal variations in the length of day. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 1498—1509. <https://doi.org/10.1002/2013JB010830>.
- Sun Position Calculation on the Google Maps. (2026). Retrieved from <https://www.suncalc.org/#/50.469,30.358,5/2026.04.25/12:55/1/1>.
- Understanding Solar Day Length Variation. (2026). Retrieved from <https://explaining-science.org/2024/07/18/understanding-solar-day-length-variation/>
- Wilcock, W.S. (2001). Tidal triggering of micro-earthquakes on the Juan de Fuca Ridge. *Geophysical Research Letters*, 28(20), 3999—4002. <https://doi.org/10.1029/2001GL013370>.