

## ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 528.48

О.М. ТРОФИМЧУК, О.А. КЛИМЕНКОВ, Ю.І. КАЛЮХ

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ ЛІВАДІЙСЬКОЇ ЗСУВНОЇ СИСТЕМИ

***Анотація.** Розглянуто систему моніторингу Центральної Лівадійської зсувної системи та результати впливу зміни фізико-механічних характеристик ґрунтів зсувного масиву на його активізацію. Система моніторингу складається з GPS, інклінометричних та акселерометричних датчиків, електронного дощоміру. Всі датчики з'єднані в єдину систему з безперервним режимом передачі даних на центральний блок обробки даних. Проведено математичне моделювання зсувного масиву по першій групі граничних станів за допомогою програми LANDSLIP 7.0.*

***Ключові слова:** моніторинг, GPS, інклінометр, акселерометр, Центральна Лівадійська зсувна система, програма LANDSLIP 7.0.*

#### Вступ

Зсуви є важливою складовою низки значних стихійних лих та завдають набагато більше шкоди й втрат, ніж загальноє визнано [1]. Зазвичай про зсуви часто згадують у зв'язку з повеннями, землетрусами або виверженнями вулканів, хоча втрати від зсувних руйнувань можуть перевищувати всі інші збитки від небезпечних природних явищ [2]. Понад 90% території України має складні ґрунтові умови. За обсягом завданих збитків зсувні процеси посідають в Україні перше місце. Загалом в Україні станом на 01.12.2011 виявлено понад 23 100 зсувів, 17 400 зсувів – станом на 01.12.1997. Таким чином, за останні 15 років відбулося збільшення кількості зсувів в 1,3 раза, а за 30 років – приблизно в 3 рази.

Активізація сейсмічної активності в зоні Вранча та Чорноморському регіоні, а також в цілому на планеті призвела до підвищення рівня сейсмічної небезпеки на всій території України та, у кінцевому підсумку, зростання відповідного зсувопровокуючого фактора. Ураженість території Криму зсувами досягає 30%. На рис. 1 зображено розміщення основних зсувів Південного Криму.

Ріст кількості зсувів відбувається головним чином за рахунок техногенних та природно-техногенних причин, причому рідше за рахунок чисто природних. За рахунок тільки техногенних причин на ПБК за останні 100 років виникло

і занесено до Кадастру зсувів ПБК близько 600 техногенних зсувів (при загальній кількості зсувів у Криму на кінець 2009 р. – 1576). Таким чином, близько 38% зсувів ПБК складають техногенні зсуви (рис. 2).

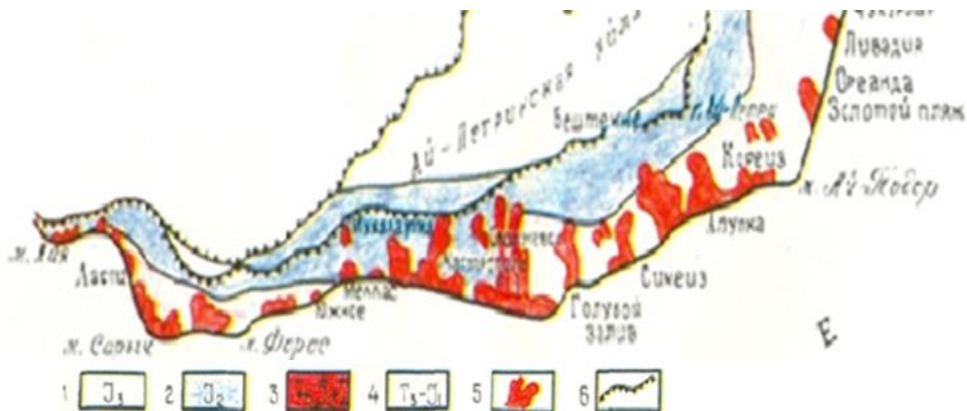


Рис. 1. – Розміщення основних зсувів Південного Криму:

- 1 – Верхньоюрські карбонатні породи;
- 2 – Середньоюрські породи (аргіліти, алевроліти, піщаники);
- 3 – Середньоюрські магматичні породи;
- 4 – Породи таврійської серії (дислоковані аргіліти, алевроліти, піщаники);
- 5 – Основні зсуви;
- 6 – Бровка яйлінського обриву

Власним існуванням вони зобов'язані не в останню чергу зміні фізико-механічних характеристик ґрунтів зсувних масивів: деградації ґрунтів (наприклад лесів), підняттю рівня ґрунтових вод та зволоженню ґрунту при опадах та витоках з каналізації, зростанню сейсмічних та динамічних впливів на ґрунтову основу, формуванню поверхонь ковзання зі зменшенням кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення ґрунту на поверхні розриву.

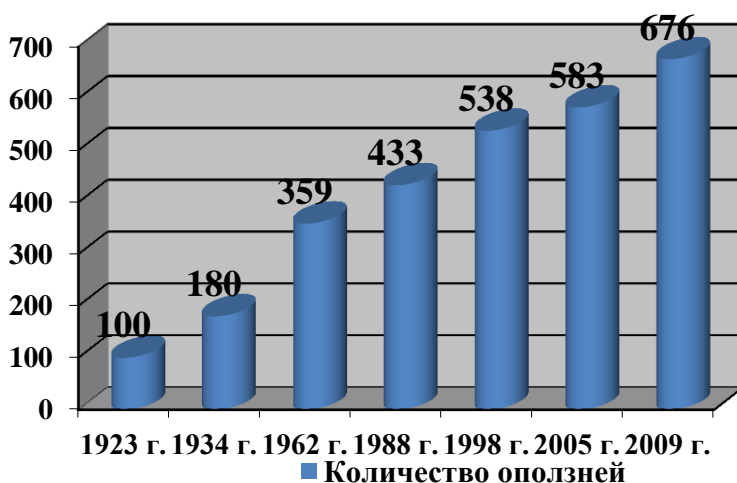


Рис. 2 – Динаміка зростання зсувів Південного Криму (від мису Костель до мису Айя)

Оцінка й аналіз всієї сукупності факторів, що призводять до формування чи активізації зсувів, з метою їх прогнозу в розвинених країнах проводиться на основі моніторингових систем. При цьому при проведенні оперативного прогнозування стійкості схилів, плануванні та вжитті невідкладних заходів зі стабілізації зсувів необхідні отримання та обробка даних спостережень в режимі, близькому до режиму реального часу. Системи моніторингу й раннього оповіщення зсувних катастроф розглянуті та досліджені в працях відомих закордонних вчених Sassa K. [4], Lollino G. [5], Highland L. and Bobrowsky P. [1], Baum R. [6], Mihalic S. et al. [7], Karnawati D. et al. [8], Reid M. and LaHusen R. [9] та ін.

### **Центральна Лівадійська зсувна система**

До 1779 р. у межах території Лівадійського палацово-паркового комплексу розташовувалось невелике грецьке село. Інтенсивне освоєння території Лівадії розпочалося у 50-х роках XIX століття. Було споруджено поміщицькі будинки, церкву, житлові та господарські будівлі. На 437 000 м<sup>2</sup> закладено парк із цінними породами субтропічних рослин: вічнозеленими миртами, лаврами, кедрами, пініями, магноліями і кримськими соснами. У 1860 р. Лівадію придбала царська родина Романових, яка доручила перебудову одного з будинків під імператорський палац. З 1866 р. Лівадія стає царською резиденцією. Під час будівництва палацу були споруджені дренажні галереї, дренажні та водопровідні системи, а також резервуари для води. Всього вже налічувалося близько 400 будинків, з яких майже 100 житлових будівель; були зведені оранжереї, молочна ферма, розбито фруктовий сад.

Лівадійський палацово-парковий комплекс розташований у межах верхньої частини Центральної Лівадійської зсувної системи (ЦЛЗС), її довжина – 1500 м, ширина у верхній частині – 200–500 м, а в нижній – 700 м, загальна крутість поверхні 13`–15`` (рис. 3). Головна (верхня) частина системи розміщена в межах абсолютної відмітки 350 м, язикова (нижня) – вздовж сучасного урізу Чорного моря. Ґрунтові води залягають повсюди на глибинах від 2,5 до 11,2–24,2 м, практично безнапірні, утворюють окремі водозбагачені зони, найчастіше зі слабким гідравлічним зв'язком, з дебітами від 0,008 до 1,8 л/с. Сейсмічна бальність території дорівнює 8 балів за шкалою сейсмічності Medvedev–Sponheuer–Karnik.

ЦЛЗС об'єднала сучасні зсуви, зсувні вогнища і потенційно-небезпечні в зсувному відношенні ділянки Лівадійського схилу. Вона являє собою своєрідну систему зсувних тіл, динаміка і механізм формування яких зумовлені структурно-тектонічними, геолого-літологічними і геоморфологічними особливостями (Ериш І., Куліш Є. [10]; Шеко А. та ін. [11]). За загальними гідрогеологічними уявленнями, територія ЦЛЗС до освоєння перебувала в сприятливих відносно зволоження порід умовах. Піднесеність її над сусідніми ділянками, розчленованість відносно глибокими ерозійними врізами створили хороші умови для дренажу розвинених тут водоносних горизонтів. Це зумовило відносну стабільність даної ділянки в порівнянні із сусідніми. Освоєння території призвело як до порушення природної рівноваги схилу, так і до зміни водного режиму (за рахунок поливів, витоків з комунікацій і т. д.). В останні роки цей процес зволоження посилюється за рахунок практичної відсутності організації дренажного і поверхневого стоку.



Рис. 3 – Центральна Лівадійська зсувна система (1-1: напрямок «Західного» зсуву; 2-2: напрямок «Східного» зсуву)

Геодинамічна обстановка в межах досліджуваного району також сприяє формуванню зсувів. Гірські породи, що складають верхню частину схилених відкладень, значно відрізняються за гранулометричним складом, фізико-механічними властивостями і обводненню. Їх напружено-деформований стан, зумовлений геодинамічними процесами, є вкрай неоднорідним. У межах активних і стабільних древніх зсувних тіл для всієї ЦЛЗС характерне чергування зон напруженого стану гірських порід з зонами відносного розуцілення. При цьому зони, що знаходяться в напруженому стані, характерні для ділянок, прилеглих до поверхонь відриву активних зсувів або різких перегинів схилів стабільних ділянок. В останні роки природна сейсмічна та техногенна динамічна активність підвищилася не тільки в межах ЦЛЗС, а й усього ПБК і північної частини Чорного моря. Щодня сейсмічні станції ПБК реєструють слабкі землетруси в 1–2–3 бали на суші і морі при окремих випадках щорічних землетрусів в 3–4–5 балів.

Територія схилу в межах Лівадійського палацово-паркового комплексу протягом понад 100 років постійно перебуває в стані стійкої (незатухаючої) повзучості з переходом на окремих ділянках в таку, що прогресує, що призводить до руйнування ґрунтів з формуванням закольних тріщин зсувів.

Швидкість повзучості в циклах підвищеної зсувної активізації досягає 2–4 см/рік в межах комплексу і більш як 6 см/рік в парковій зоні. Схильність до проявлення деформацій повзучості для ґрунтів ПБК підтверджується результатами досліджень їх реологічних характеристик багатьма дослідниками (Аносова Л. та ін. [12]). Було встановлено, що в межах послаблених зон (старих і давніх площин ковзання) при навантаженнях до 95–98% від умовно миттєвої міцності спостерігається незатухаюча повзучість з приблизною в'язкістю  $10^{14}$ – $10^{16}$  пуаз. Найбільш дисперсні й пластичні зразки ґрунтів з великим (до 15%) вмістом уламкових включень показують незатухаючу повзучість в тому самому інтервалі значень в'язкості, але при менших навантаженнях (близько 65–75% від умовної миттєвої міцності).

Інженерний захист на Лівадійському схилі частково формувався під час будівництва палацу (1911–1912 рр.) і складався з дренажних галерей, зливостоків і підпірних стін. Після революції 1917 р. в Росії, коли територія переходила до різних відомств СРСР, йшло інтенсивне зведення будівель і споруд на прилеглих до Лівадійського палацу ділянках, проводилася реконструкція водогінних комунікацій, а будівництво нових проводилося без урахування раніше побудованих. У 1965–1968 рр. споруджено комплекс берегозахисних споруд – буни і міжбунне засипання (штучні пляжі), гідротехнічні стінки, вантажна пристань. Перераховані споруди до цього часу деформуються, у зв'язку з чим не спроможні протистояти розвитку зсувних і абразивних процесів. Інтенсифікації зсувних процесів сприяла відсутність контролю за водонесучими і дренажними спорудами, витоки з яких, разом з порушеною системою поверхневого стоку, призвели до обводнення території Лівадійського палацово-паркового комплексу. До того ж дренажна галерея навколо палацу негативно впливає на стійкість схилу (створює підпір ґрунтовим водам, зволожує ґрунти, підвищує гідрогеологічні сили).

Для ЦЛЗС характерна періодична активізація зсувних тіл. Протягом 17 років (1980–1997 рр.) спостерігалось 3 цикли активності (1981–1983 рр., 1986–1989 рр. і 1995–1997 рр.). Зумовлено це переважно природними факторами, однак велику роль в активізації зсувних тіл відіграє і техногенний вплив. Для досліджуваного району характерна потужність зсувних щелево-глинистих відкладень, що змінюється від 5–15 до 25 м. Нижче цих відкладень залягає таврійської флік (аргіліти, пісковики, алевроліти). Територія досліджуваного району перетинається тектонічними порушеннями північно-західного і північно-східного простягання, роль яких не виключається в активізації зсувних тіл.

У зв'язку з інтенсивним будівництвом у 60–70-ті роки у верхній частині Лівадійського палацово-паркового комплексу автодороги Ялта–Севастополь та санаторного комплексу «Прикордонник» на всій його території почали інтенсивно розвиватися зсувні процеси. Через вищезазначене в сучасних умовах ЦЛЗС має досить високий коефіцієнт техногенного навантаження, що досягає 0,8 у верхніх і до 1,0 в нижніх частинах [14]. По всій території є досить розгалужена і густа мережа водонесучих комунікацій (щодо старих комунікацій документація загублена). За останні 10 років (Трофимчук О. et al. [13]) намітилася стійка тенденція зростання інтенсивності зсувних деформацій ґрунтового масиву, що проявляється в розширенні площ локальних

зсувних тіл, руйнуванні підпірних стін, дренажних і водовідвідних споруд, комунікацій, в розширенні старих і появи нових тріщин на будівлях палацового ансамблю і власне царському палаці.

Нині в результаті комплексного впливу природно-техногенних чинників в межах Лівадійського палацово-паркового комплексу формуються і розвиваються просторово взаємопов'язані і взаємозумовлені небезпечні геологічні процеси: зсуви, підтоплення території, абразія тощо. При обстеженні «Східного» зсуву (рис. 3) спостерігаються зсувні уступи уздовж під'їзної дороги з осіданням частини дорожнього полотна, а також численні тріщини розтягання в підпірних стінах, що огорожують дорогу (Малюк Ю. і Саломатін В. [14]). Наразі проїзд по дорозі не можливий, а зруйновані ділянки дороги використовуються як звалища ґрунтів і господарсько-побутового сміття, що привантажує головні частини активних зсувів. Під загрозою руйнування опинився каналізаційний колектор, прокладений вздовж нижньої зруйнованої підпірної стіни на опорах, що потрапляють в межі активного зсуву. «Західний» зсув (рис. 3) проявляється на схилі, будівлях і спорудах у вигляді тріщин і поверхонь відриву. Спостерігаються руйнування підпірних стін і пішохідних доріжок при перетині їх з бортовими зонами зсувного тіла (рис. 4).



Рис. 4 – Розрізання дороги з огорожувальними підпірними стінами лівим бортом «Західного» зсуву

Означені деформації на асфальтовому покритті дороги західніше Лаврової альтанки вказують на розширення зсувних меж «Західного» зсуву. У результаті зсувних переміщень повністю зруйнована Лаврова альтанка (рис. 5).



Рис. 5 – Руйнування Лаврової альтанки правим бортом «Західного» зсуву

Тріщиною відколу «Західного» зсуву перерізаний водовідвідний колектор південної гілки дренажної галереї (вона побудована одночасно із царським палацом на початку ХХ століття), що погіршує зсувну обстановку на схилі. Розвиток нижньої західної частини зсувної системи та її стійкість цілком залежить від обводнення ґрунтів схилу і зсувних тіл дренажно-техногенними водами, що надходять в основному зі зруйнованої водовідвідної труби південної гілки дренажної галереї (рис. 6). Нижче дороги в язиковій частині «Західного» зсуву (поблизу виходу з тунелю верхнього ліфтопідйомника) спостерігається виклинювання ґрунтових вод, пов'язаних з витокami з порушеної зсувними переміщеннями східної гілки колектора дренажної галереї. Основними факторами утворення «Східного» і «Західного» зсувів є: значна крутизна природного рельєфу та покрівлі корінних порід таврійської серії (аргіліти з прошарками пісковиків), що підстиляють четвертинні утворення; висока обводненість покривних верхньо-четвертинних і сучасних відкладень (суглинисто-щебенисті накопичення) за рахунок витоків з водогінних комунікацій, включаючи дренажну галерею, особливо в місцях їх примикання до водовідвідних колекторів (труб); сейсмічна і динамічна активізація в останні роки. Перераховані вище зсуви руйнують Лівадійський палацово-парковий комплекс, різноманітні комунікації (як, наприклад, міський каналізаційний колектор), шахти ліфтопідйомників (де на глибинах 18 і 30 м відбувається зріз тубінгових болтів), а також берегоукріплювальні споруди в язикових частинах «Західного» і «Східного» зсувів ЦЛЗС.



Рис. 6 – Зруйнована водовідвідна труба південної гілки дренажної галереї

Подальший розвиток зсувних процесів може призвести до значних руйнувань будівлі Лівадійського палацу та прилеглої території. Під загрозою руйнування знаходиться система дренажу в південно-східній частині палацу. Загальна стійкість ЦЛЗС стрімко знижується через збільшення різноманітних техногенних навантажень на тлі дії природних чинників, у результаті чого до цього часу в межах палацу і прилеглої території сформувалось 10 локальних (досить розвинених) зсувів.

Враховуючи, що з 1995 р помітно посилилася активізація зсувних процесів в районі «Західного» зсуву, основна увага при проведенні наших досліджень було зосереджена на ділянці схилу, де розташований сам Великий Лівадійський палац і прилегла до нього територія зсувного схилу, практично, до сучасного урізу Чорного моря. Саме тут в останні роки спостерігаються значні зсувні прояви (в язиковій частині зсувів руйнуються берегоукріплення та інтенсифікується абразія берегів (Малюк Ю. і Саломатін В., 2006)).

### **Моніторингова система ЦЛЗС**

З метою зниження і виключення ризику для подальшої експлуатації Лівадійського палацово-паркового комплексу (Kaliukh I. [15]) було втілено в життя «Програму робіт зі збереження Лівадійського палацово-паркового комплексу від небезпечних геологічних процесів», що являє собою систему науково обґрунтованих і взаємопов'язаних проектно-пошукових, захисних і літомоніторингових заходів, як локальних, у межах палацу, так і по всій території ЦЛЗС.



Для аналізу зсувонебезпечних геологічних процесів ЦЛЗС була використана система раннього попередження та моніторингу ZSUV (Trofymchuk O. et al. [13]), один з фрагментів якої наведено на рис. 7.

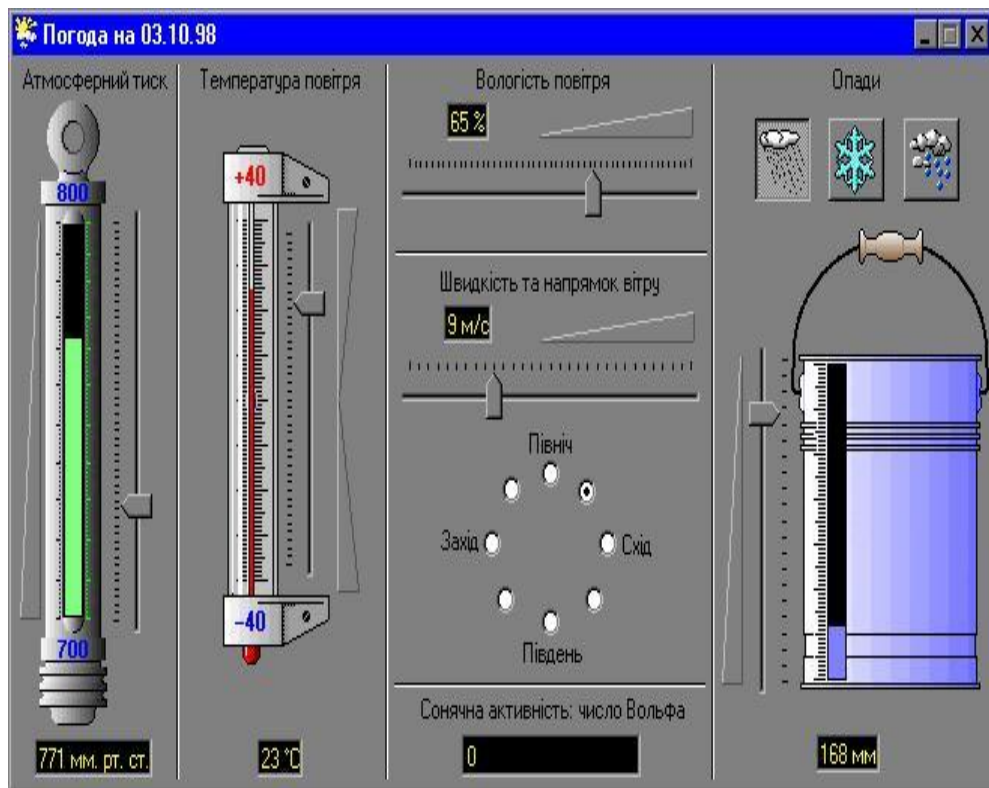


Рис. 7 – Система раннього попередження та моніторингу ЦЛЗС ZSUV

Вимірюються:

- рівні ґрунтових вод у визначених геологами шпарах;
- кути нахилу виділених елементів (визначених експертами) усередині досліджуваного водонебезпечного зсувного схилу (кутові деформації пробурених у схилі вимірювальних шпар);

- інші параметри, що характеризують літодинаміку зсувів ЦЛЗС.

Докладніший опис моніторингової системи раннього попередження ZSUV ЦЛЗС наведено в доповіді О.М. Трофимчука на конференції в м. Куріо, Японія, в 2012 р. [13].

Первинна статистична обробка, реалізована в програмі «ZSUV» (рис. 8), відповідає ГОСТ 8.011-72 («Показники точності вимірювань та форми подання результатів вимірювань») і полягає в:

- мінімізації обсягу вибірки випадкових величин (багаторазових вимірювань) при заданій довірчій ймовірності;
- описі її статистичних параметрів при невідомому законі розподілу щільності ймовірності випадкової величини;
- обчисленні інтервалу невизначеності кута нахилу із заданою довірчою ймовірністю;

- накопиченні статистичних параметрів про кути нахилу в часі;
- виявленні змін кута нахилу з оперативним інформуванням чергового оператора;
- спектральному аналізу вибірок даних багаторазових вимірювань;

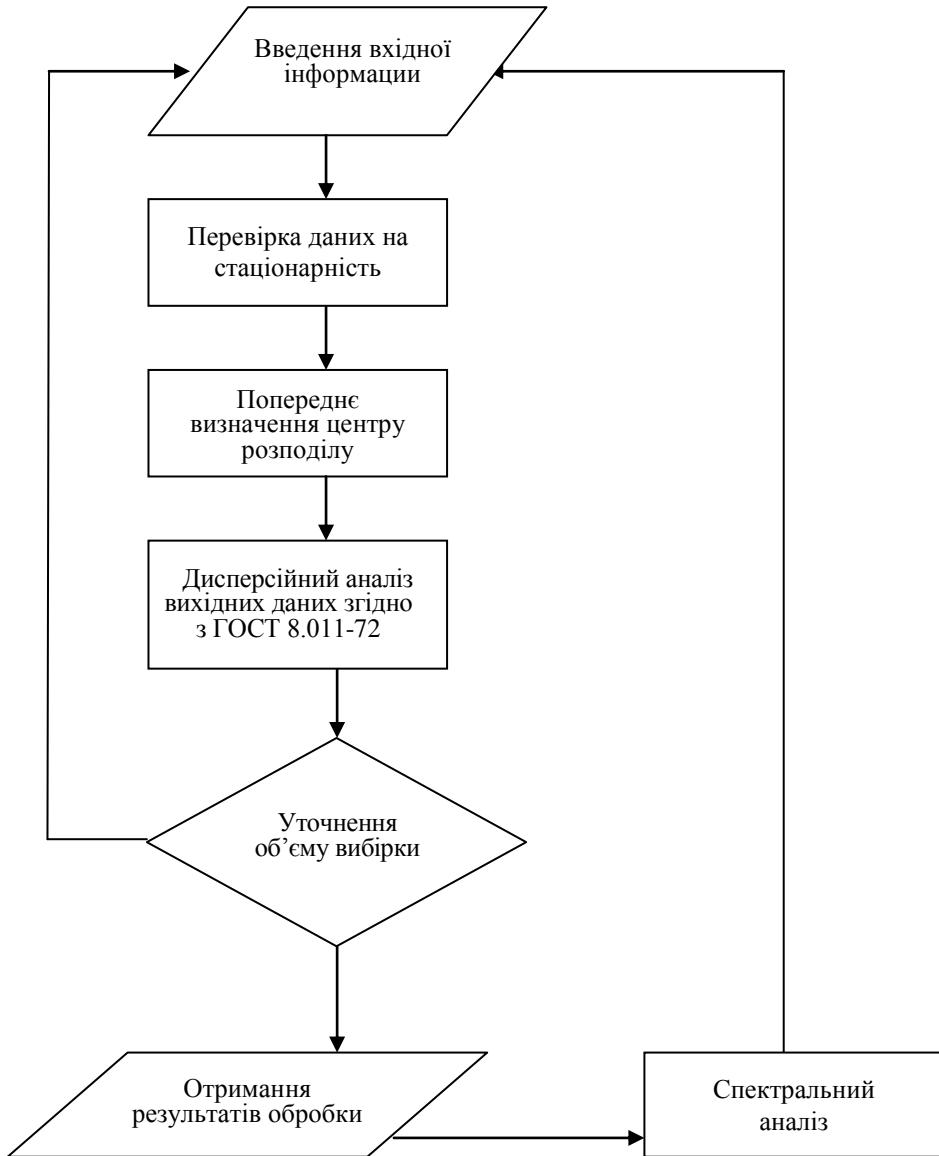


Рис. 8 – Структурний алгоритм первинної обробки даних вимірювань показників ZSUV

- регресійному аналізу результатів вимірювань і прогнозуванні еволюції процесу, що реєструється;
- графічному представленні результатів первинної обробки даних багаторазових вимірювань на дисплеї;

- створенні архіву протоколів обробки результатів багаторазових вимірювань із зберіганням його на жорсткому диску ПЕОМ.

Математична модель первинної статистичної обробки вимірювальної інформації ZSUV розроблена відповідно до вимог до апаратно-програмного комплексу з реєстрації даних і призначена для вирішення наступних завдань:

- докладне уявлення результатів вимірювань згідно з ГОСТом 8.11-72;
- побудова точних довірчих інтервалів розкиду даних шляхом урахування похибок вимірювальної системи;
- виявлення навіть незначних, але статистично достовірних змін даних за допомогою методу перевірки статистичних гіпотез;
- прогнозування розвитку процесів за зміною певних параметрів:

1. прогнозування за зміною форми закону розподілу вибірки одиничних вимірювань;

2. прогнозування з використанням результатів вимірювальної інформації, отриманої за кінцевий проміжок часу (часу моніторингу).

### Математичне моделювання схилу ЦЛЗС

На основі проведених експериментальних досліджень динамічних характеристик ґрунтів ЦЛЗС і Лівадійського палацу були виконані розрахунки НС ряду зсувів ЦЛЗС. При цьому були використані відповідні геодезичні та інженерно-геологічні матеріали ЦНТП «Інжзахист», м. Ялти про будову ЦЛЗС, на основі яких було побудовано ряд вертикальних перерізів ЦЛЗС. На рис. 9. схематично зображено використаний нами в розрахунках вертикальний переріз ЦЛЗС, який включає Лівадійський палац. З його аналізу випливає складний характер зсувної системи ЦЛЗС, яка включає безліч окремих зсувів, деякі з яких розвиваються по поверхні як нижчележачих по схилу, так і нижчележачих по вертикалі в поперечному перерізі.

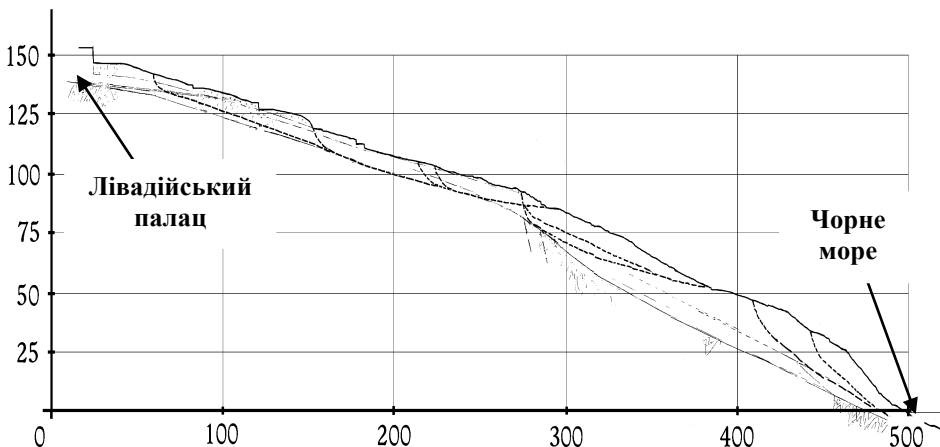


Рис. 9 – Вертикальний переріз ЦЛЗС, що включає Лівадійський палац. На основі експериментальних даних ЦНТП «Інжзахист» також було встановлено, що на окремих ділянках ЦЛЗС вертикальна товщина ґрунту, який зміщується вниз по схилу, досягає 10–15 м

Все це, з одного боку, значно ускладнює завдання коректного математичного моделювання НДС ЦЛЗС, з іншого – стимулює крайню необхідність виконання попередніх, оціночних розрахунків ЦЛЗС на основі наявних спрощених моделей з метою виявлення закономірностей її літодинаміки та прогнозування розвитку ситуації при зміні фізико-механічних характеристик зсувних масивів ЦЛЗС.

Для математичного моделювання була вибрана зсувна ділянка протяжністю 140 м по горизонталі нижче Лівадійського палацу, зважаючи на найбільшу небезпеку, яку представляють зміщення ґрунту на цій ділянці для цілісності будівельних конструкцій палацу. На цій ділянці знаходиться підземна каналізаційна галерея, яка була «перерізана» зсувними переміщеннями «Західного» зсуву (рис. 6).

Для математичного моделювання стійкості зсувного схилу по першій групі граничних станів в програмі LANDSLIP 7.0 була побудована графічна модель досліджуваного схилу, зображена на рис. 10.

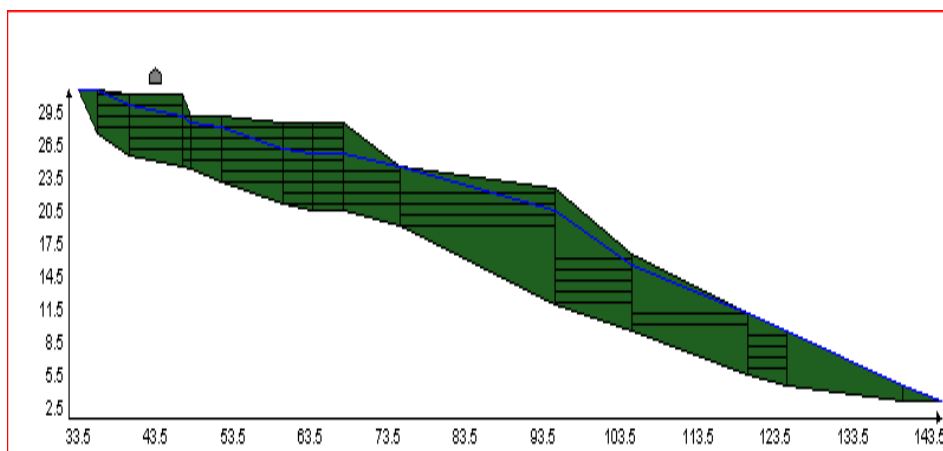


Рис. 10 – Розрахункова графічна модель зсувного схилу з Лівадійським палацом (модельованим пригрузом у верхній лівій частині моделі) і ґрунтовими водами (синя лінія) в програмі LANDSLIP 7.0

Було розглянуто три випадки:

- Варіант 1. Зсувний схил за відсутності Лівадійського палацу та ґрунтових вод.
- Варіант 2. Зсувний схил з Лівадійським палацом і за відсутності ґрунтових вод.
- Варіант 3. Зсувний схил з Лівадійським палацом і ґрунтовими водами (рис. 10).

Результати оціночних попередніх розрахунків на основі моделей Масло-ва-Берера і Шахунянца наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1 – Коефіцієнт стійкості зсувного схилу, отриманий на основі моделі Масло-ва-Берера

Сейсмічність, балів	Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3	
	8 балів	9 балів	8 балів	9 балів	8 балів	9 балів
$K_y$	1,20	1,03	1,30	1,1	0,87	0,77

Таблиця 2 – Коефіцієнт стійкості зсувного схилу, отриманий на основі моделі Шахунянца

Сейсмічність, балів	Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3	
	8 балів	9 балів	8 балів	9 балів	8 балів	9 балів
$K_y$	1,22	1,04	1,32	1,13	0,86	0,76

Результати розрахунків дозволяють зробити наступні висновки:

1. Якісний характер епюри зсувного тиску і коефіцієнт стійкості незначно змінюються від варіанта 1 до варіанта 2. Це зумовлено в першу чергу великою протяжністю схилу, а також його пологим характером.

2. Грунтові води, однією з причин яких є обводнення зсувного схилу каналізаційними надходженнями з Лівадійського палацу через відвідну галерею (рис. 6), мають катастрофічний характер як для палацу, так і для нижче розташованого зсувного схилу. Спостерігається суттєва зміна зсувного тиску уздовж по схилу, що призводить до підсумкового значення коефіцієнта стійкості значно менше первинного (~ на 30%). Зсувний схил зі стійкого перетворюється на нестійкий. Цей факт підтверджується моніторинговими спостереженнями ЦЛЗС, зсувні зрушення якої корелюють з активною експлуатацією водолікарень санаторіїв «Лівадія» і «Прикордонник», які розташовані вище по схилу від Лівадійського палацу.

3. Зміна фізико-механічних характеристик ґрунтів ЦЛЗС є визначальним фактором її активізації та ініціювання процесів деформації і тріщиноутворення у фундаментах, підлозі і стінах Лівадійського палацу. Обводнювання ґрунту, збільшення сейсмічного навантаження, як впливає з таблиць 1 і 2, можуть радикально змінити напружено-деформовану картину зсувного схилу, ініціювати перехід його зі стійкого стану в нестійкий. При цьому ми не проводили розрахунків при зменшенні кута внутрішнього тертя і коефіцієнта питомого опору ґрунту. Як відомо з теорії і практики, ці фактори здатні додатково зменшити первинний коефіцієнт стійкості не менш ніж на 10–15%.

## Висновки

1. Останніми роками всі елементарні зсуви ЦЛЗС не тільки були активними, а й мали явні тенденції до розширення і об'єднання в просторі. Особливо останнє характерне для зсувів, що реально загрожують палацу за рахунок формування горизонтальних тріщин розтягання шириною 2–5...50 мм, як у межах палацу, світського корпусу, церкви, так і нижче – на пішохідних доріжках. У зоні активних зсувних процесів («Східний» зсув (рис. 3)) опинилися дві нитки діючого каналізаційного колектора. По них здійснюється скидання стоків із санаторних комплексів і здравниць, розташованих західніше Лівадійського палацово-паркового комплексу (санаторіїв «Лівадія», «Гліцинія», «Нижня Ореанда», «Прикордонник»), включаючи с. Ореанда. Фактично міський каналізаційний колектор відчуває зсувний тиск з реальною загрозою прориву, в результаті якого стоками буде забруднена вся територія Лівадійського парку і акваторія Чорного моря, що можна розглядати як екологічну катастрофу на даній ділянці узбережжя.

2. За результатами моніторингових спостережень виявлена тенденція розвитку трьох локальних зсувів, розташованих нижче палацу. Прогнозується, що палац і прилегла з південного сходу територія через 2–4 роки опиняться в зоні інтенсивного тріщиноутворення, а в 2016–2018 рр. – в зоні активних зсувних зміщень [17]. Не виключається, що ефект підтоплення Лівадійського палацу і його території, а також прогресуюче руйнування берегоукріплень можуть інтенсифікувати зсувний процес. Локальні зсуви будуть вільно розширюватися (прогресивно і регресивно) і об'єднуватися в просторі, формуючи тим самим єдиний великий зсув по всій території ЦЛЗС в межах «Східного» і частини «Західного» (рис. 3) зсувів вже в 2016–2018 рр. [17].

3. У результаті математичного моделювання отримано, що зміна фізико-механічних характеристик ґрунтів ЦЛЗС є визначальним фактором її активізації та ініціювання процесів деформації і тріщиноутворення у фундаментах, підлозі і стінах Лівадійського палацу. Обводнювання ґрунту, збільшення сейсмічного навантаження, як впливає з таблиць 1 і 2, можуть радикально змінити напружено-деформовану картину зсувного схилу, ініціювати перехід його зі стійкого стану в нестійкий. При цьому ми не проводили розрахунків при зменшенні кута внутрішнього тертя і коефіцієнта питомого опору ґрунту. Як відомо з теорії і практики, ці фактори здатні додатково зменшити первинний коефіцієнт стійкості не менш ніж на 10–15%.

4. Необхідно вжити термінових заходів місцевим і центральним органам влади щодо зниження ризику активізації небезпечних природних процесів, що можуть призвести до руйнування усесвітньо-відомого пам'ятника історії і архітектури – Лівадійського палацу імператора Миколи II. Ці заходи повинні спрямовуватись на збереження Лівадійського палацово-паркового комплексу та пристосування його до нових екологічних і соціальних умов.

5. В останні десятиліття концепція культурної спадщини (Margottini С. і Vilimek В. [18], Migon Р. [19]) перетворилася на таку, що охоплює розуміння історії людства в сукупності з науковими знаннями та інтелектуальними відносинами. Ця зміна концепції спонукала до подальшого переосмислення видатних універсальних цінностей об'єктів всесвітньої спадщини та розробки системних підходів до створення всеосяжних оперативних методів для втілення в життя Конвенції про охорону всесвітньої спадщини ЮНЕСКО [15]. Таке світорозуміння розширило діапазон досліджень від вивчення та збереження окремої пам'ятки культури ізольовано від довкілля до багатовимірного, міжрегіонального та міждисциплінарного підходу збереження культурної спадщини людства та охорони навколишнього простору.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Highland L., Bobrowsky P. The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides: Reston, U.S. Geological Survey Circular, Virginia, 2008. – 129 p.
2. Lacasse S. 8th 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, 2013. – P. 15–34.
3. Ученые: Сильные землетрясения могут быть во всей Украине. Режим доступу: <http://for-ua.com/ukraine/2011/03/23/085121.html>
4. Sassa K. Landslides: Risk analysis and sustainable disaster management. – 2005 [Online], <http://www.ebook3000.com/Kyoji-Sassa-Landslides-Risk-Analysis-and-Sustainable-Disaster-Management-147509.html>.

5. Lollino, G. Engineering Geology for Society and Territory // IAEG XII Congress Volumes Lollino, Giorgio (Ed.), 2014. – 8643 p., 8 volume-set.
6. Baum, R.L., Godt, J.P., Harp, E.L., McKenna, J.W. & McMullen, S.R. Early warning of landslides for rail traffic between Seattle and Everett, Washington, USA. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture & E. Bernhard (eds), Landslide Risk Management // Proc. of the 2005 International Conference on Landslide Risk Management: 731–740.
7. Mihalic S., Mihalić A., Željko A., Martin K. TXT-tool 2.385-1.2 A comprehensive landslide monitoring system: The Kostaňek landslide, Croatia 2013. [https://scholar.google.fr/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&user=7eoSoYYAAAAAJ&citation\\_for\\_view=7eoSoYYAAAAAJ:D03iK\\_w7-QYC](https://scholar.google.fr/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=7eoSoYYAAAAAJ&citation_for_view=7eoSoYYAAAAAJ:D03iK_w7-QYC)
8. Karnawati D., Teuku F., Wahyu W., Syamsul M. TXT-tool 4.062-1.1 A Socio-Technical Approach for Landslide Mitigation and Risk Reduction 2013. <http://iplhq.org/icl/wp-content/uploads/2015/07/2-3-TXT-Tool-4.062-1.1-A-Socio-Technical-Approach-for-Landslide-Mitigation-and-Risk-Reduction.pdf>
9. Reid M., LaHusen R. Real-time monitoring of active landslides along Highway 50, El Dorado County. California Geology 51 (3): 1998 – P. 17–20.
10. Ерыш И. О роли сейсмических факторов в образовании оползней Южного Крыма / И. Ерыш, Е. Кулиш // Доповіді «Будівництво в сейсмічних районах України» – Ялта, Держкомбудівництва України. – 1998. – С. 147–151.
11. Шеко А. Анализ и прогноз развития оползневых процессов. Южный берег Крыма / А. Шеко, П. Дворцов, И. Ерыш и др. // Прогноз экзогенных геологических процессов на Черноморском побережье СССР / Под ред. А.И. Шеко – М.: Недра. – 1979 – С. 140–146.
12. Аносова Л. Закономерности формирования свойств оползневых отложений / Л. Аносова, И. Коробанова, А. Копылова. – М.: «Наука». – 1976. – 182 с.
13. Trofymchuk O., Kaliukh I., Hlebchuk H., Berchun V. Experimental and analytical studies of landslides in the south of Ukraine under the action of natural seismic impacts // Earthquake-Induced Landslides. Proceedings of the International Symposium on Earthquake-Induced Landslides, Kiryu, Japan, 2012. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013. – P. 883–890.
14. Малюк Ю. Развитие опасных геологических процессов в пределах Центрально-Ливадийской оползневой системы. Защита и сохранение Ливадийского дворцово-паркового комплекса / Ю.А. Малюк, В.Н. Саломатин // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. – Симферополь: НАПКС., – 2006. Вып. 13–14. – С. 205–212.
15. Kaliukh I. Application of modern information technologies, mathematical methods and measure instruments for registration and forecasting evolution of the process in the dangerous areas (in Russian). – Kiev: Society «Knowledge». 1999. – 64 p.
16. Комп'ютерна програма «Програма комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану схилів в умовах зміни інженерно-геологічних умов: підтоплення, землетрусів та інженерної підготовки територій (LANDSLIP07)» / Глебчук Г.С., Трофимчук О.М., Калюх Ю.І. // Свід-во про реєстр. авт. права на твір №26501. Дата реєстрації 18.11.2008. – Київ: Держ. департ. інтелект. власності, 2008. Офіц. бюлетень «Авторське право і суміжні права», № 17, 2008. – С. 334–335.
17. Trofymchuk O. IPL-153 Project «Landslide protection structures and their development in the Autonomous Republic of the Crimea, Ukraine» 2011–2014.
18. Margotini C, Vilimek V The ICL Network on «Landslides and Cultural & Natural Heritage (LACUNHEN)» // Landslides 11, 2014. – ISSN:1612-510X: 934–938.
19. Migon P Cultural heritage and natural hazards // In: Bobrovsky (ed) Encyclopedia of natural hazards. Springer Science + Business media, Dordrecht, 2013.
20. The World Heritage Convention, 1972. Режим доступу: <http://whc.unesco.org/en/convention>

*Стаття надійшла до редакції 03.09.2015*