

*Б.М. Островерх, к.т.н., пров.н.с.
О.А. Савицький, д.т.н., пров.н.с.
Інститут гідромеханіки НАН України
Л.С. Потапенко, пров. спец. ГІС
Український центр менеджменту Землі та ресурсів*

МОНІТОРИНГ ТА ПРОГНОЗ РУЙНУВАННЯ ҐРУНТОВИХ СХИЛІВ

Розроблено методику визначення механізму та швидкості руху зсувів, яка ґрунтується на феноменологічному підході до визначення типології зсувів на основі даних моніторингу та чисельній моделі розрахунку граничних деформацій схилів, які розглядаються як в'язке ґрунтове середовище.

Ключові слова: *деформація в'язких ґрунтів, чисельне моделювання, моніторинг зсувних схилів.*

*Б.Н. Островерх, к.т.н., вед.н.с.
О.А. Савицький, д.т.н., вед.н.с.
Інститут гідромеханіки НАН України
Л.С. Потапенко, вед. спец. ГІС
Український центр менеджменту Землі та ресурсів*

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВЫХ СКЛОНОВ

Разработана методика определения механизма и скорости движения оползней, которая основана на феноменологическом анализе типологии оползней на основе данных мониторинга и численной модели расчета критических деформаций грунтовых склонов, которые рассматриваются как вязкая грунтовая среда.

Ключевые слова: *деформація вязких ґрунтів, численне моделювання, моніторинг сдвигових склонов.*

*B.M. Ostroverkh, Ph.D. Techn. sci., Leading scientist
O.A. Savitsky, Dr. Techn. sci., Leading scientist
Hydromechanics Institute of NAS Ukraine
L.S. Potapenko, Senior Specialist on GIS
Ukrainian Earth and Resource Management Center*

ON THE MONITORING AND FAILURE FORECAST OF SOIL SLOPES

The method of landslide mechanism and velocity of motion estimation is proposed. The method is based upon the numerical model of landslide calculation as inhomogeneous viscous media and natural monitoring data analysis to distinguish the type and critical deformation of landslide material.

Keywords: *viscous soils deformation, computational simulation, slopes failure monitoring.*

Вступ. Як зазначають дослідники [3–8], незважаючи на певні досягнення у розумінні механізмів зсувів різних типів та за наявності можливості проведення розрахунків за допомогою чисельних моделей, передбачення початку катастрофічного швидкого руху та відповідного поширення (викиду) зсувних мас і досі видається надзвичайно важким. Тобто відповідь на основне питання, коли та з якими параметрами відбудеться руйнування схилу й чи буде воно мати катастрофічні наслідки, залежить від багатьох факторів, які

можна отримати на основі досвіду, використання аналогів у зсувонебезпечних місцях зі схожими умовами, аналізу результатів моніторингу та математичного і лабораторного моделювання напружено-деформованого стану схилів. Жодний із цих підходів не є безпомилковим, і тому часто вони використовуються всі разом [8].

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Методика оцінювання механізму, прогнозу розміру (довжини виносу) та швидкості руху зсуву ґрунтується на феноменологічному підході до визначення типології зсувів, який розроблено у працях М.М. Маслова, К. Терцагі, О. Енгра (O. Hungr) та інших [1, 2, 8].

Для передбачення характеру й місця зсуву, по-перше, розрізняють крихкі та текучі типи руйнування схилів залежно від властивостей матеріалів. На жаль, існують також багато перехідних груп, які виявляють одночасний чи послідовний характер руйнування у вигляді основних груп, особливо з урахуванням впливу зволоження ґрунтів унаслідок природних та техногенних факторів.

Багато виключно швидких потокових зсувів ковзання виникають у структурах, які складаються в основному з двох шарів – сухий чи вологий ґрунт на тонкому насиченому вологою шарі, який розріджується. Надзвичайно рухливі («швидкі») потокові зсуви глинистих ґрунтів завжди являють собою дуже інтенсивне явище як з точки зору започаткування, порушення структури, руйнування та під час просування у вигляді потоку. Те саме можна відмітити про потокові зсуви пухкого водонасиченого піску, часто підводні.

Термін «потоковий зсув» уведено для позначення зсуву, який супроводжується розрідженням зони водонасиченого ґрунту біля розриву поверхні, що невідворотно призводить до катастрофічного прискорення. У той же час сухі гранульовані потоки є повільними. Проте вважається, що багато надшвидких потокових зсувів складаються в основному із сухих чи вологих ґрунтів, а ефект розрідження відбувається тільки у тонкому водонасиченому шарі в основі. Таке явище спостерігається на добре гранульованих хвостосховищах кар'єрів і шахт та лесових відкладеннях. Можливо, що найбільша історична катастрофа 1921 р. у вигляді серії лесових потокових зсувів сталася на Лесовому Плато (Китай) з 280-ма тисячами жертв мала такий саме механізм (але супроводжувалася потужним землетрусом, який міг стати додатковим спусковим ефектом).

Вважається [4], що розрідження ґрунту на поверхні розриву може відбуватися в результаті руйнування під час тривалого переміщення зсуву, коли переміщення зруйнованих зерен ґрунту супроводжується підвищенням порового тиску. Це може пояснити мобільність багатьох відносно заглиблених потокових зсувів, що спостерігаються у відкладеннях, які, можливо, починаються зсувом по реліктових розламах.

Прогноз часу та попередження зсуву повинен базуватися на довгострокових вимірах (моніторингу) поверхневих і підземних

переміщень, нахилів. Так, роблячи опис динаміки зсувів, Терцагі [1] зауважив, що багатьом зсувам передують поступове зменшення відношення дотичного опору до зусилля зсуву (коефіцієнта стійкості), яке супроводжується переміщенням ділянок схилу в долину. Коли коефіцієнт стійкості зменшується до одиниці, зміщення схилу починає різко пришвидшуватися та відбувається катастрофічне руйнування. Згідно з думкою Терцагі розмір переміщення, що накопичується як повзучість (крип) схилу в долину аж до руйнування, порівнюється з товщиною базової зони зсувних напруг, тобто із зоною, в якій напружений стан досягає стану руйнування. Якщо ця зона є дуже тонкою, то зсув схилу до руйнування може бути порядку міліметрів. Якщо можлива поверхня ковзання потрапляє до товстішої зони всередині шару однорідного ґрунту, наприклад, глини, тоді схил може розвивати переміщення порядку метрів, аж до моменту катастрофічного руйнування. Катастрофічними руйнуваннями вважаються зсуви, що відбуваються дуже швидко (більше 1 м/с) та захоплюють великі простори та багато споруд.

Хоча у сучасній практиці проведення моніторингу руху схилу передбачається у більшості проектів шахтних і геотехнічних споруд, проте для природних схилів такі спостереження та реєстрація деформацій провадяться дуже рідко. Для наближення до задачі передбачення моменту зрушення зсуву використовувалися підходи визначення повзучості матеріалів під час третинного (прискореного) крипу, який завершує початкову (повільну) та вторинну (стабільну) стадії повзучості. Запропоновано на базі постійних, безперервних вимірювань переміщень відносно схилу розраховувати постійні швидкості деформацій та порівнювати їх з оцінками тривалості крипового руйнування, отриманого під час лабораторних випробувань [5]. На основі обробки результатів спостережень у вигляді лінійних співвідношень між логарифмом першої та другої похідної переміщень схилу (тобто швидкості та прискорення крипу) було запропоновано використати ці лінійні співвідношення для отримання середніх зворотних швидкостей $1/v_i$ (повільностей) як простого графоаналітичного засобу прогнозу катастрофічних зсувів [6] у момент, коли функція

$$\frac{1}{v_i} = \frac{\Delta t_i}{\Delta x_i}$$

перетинається з віссю часу, де Δx_i – переміщення поверхні схилу за період Δt_i за даними моніторингу. Використання таких даних ґрунтується на розробленій методиці застосування геоінформаційних систем [14] та цифрування літературних даних за малюнками.

Одним з найбільш досліджених випадків є зсув, що стався на новобудові водосховища Вайонт (Італія). Уранці 9 жовтня 1963 р. у результаті великої зливи та, як задокументовано, невеликого землетрусу, на західному борті водосховища стався величезний зсув. За 30 с він досяг

протилежної стінки каньона, витіснивши до 50% ємності водосховища, що у вигляді хвилі досягло західного борту та зруйнувало містечка Кассо та Ерто. Потім хвиля цунамі висотою 250 м, яка утворилася, перехлюпнула через греблю висотою 264 м та знищила 5 міст, що були розташовані нижче в долині. Ця катастрофа призвела до загибелі майже 3 тис. людей. Приблизно за два роки до цієї події відбувся перший зсув, визначений як наслідок заповнення водосховища. Через це більше ніж на півроку мушили припинити заповнення водосховища (рис. 1). У результаті прийнятого рішення продовжили наповнення, що призвело до пришвидшення сповзання. При зменшенні рівня водосховища сповзання уповільнилося і тоді було прийняте помилкове рішення про наповнення водосховища до проектної відмітки 710 м, хоча аналіз результатів моніторингу свідчив, що вже при перевищенні рівня відмітки 660 м стійкість схилу почала знову значно зменшуватися. У поєднанні зі зливою (рис. 2) заповнення водосховища призвело до катастрофи. Усі ці дані було достатньо повно зареєстровано.

Точки перетинання графіка зворотної швидкості, побудованого за даними моніторингу, з віссю абсцис відповідають датам попередніх зсувів і пришвидшень сповзання схилу та катастрофічного зсуву в жовтні 1963 р. На рис. 3 видно, що із середини 1963 р., тобто з поверненням до заповнення водосховища, відбувалося практично лінійне зменшення повільності, графік якої перетинається з віссю часу в момент, який відповідає початку катастрофічного зсуву. Таким чином, із застосуванням методики [6] можна було передбачити катастрофу та здійснити заходи для її попередження.

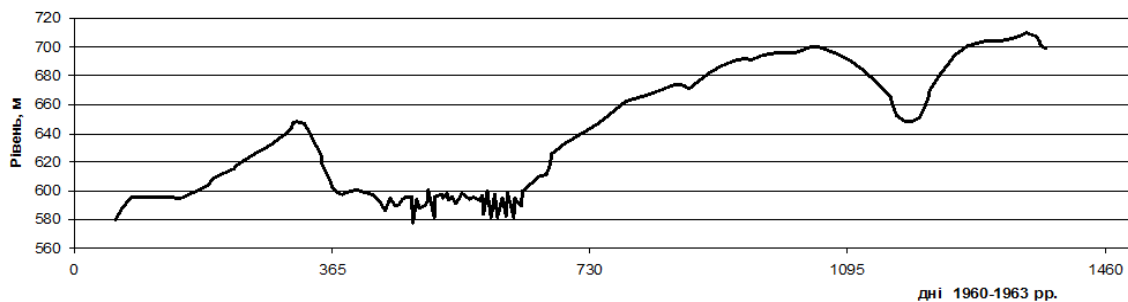


Рис. 1. Графік наповнення водосховища Вайонт

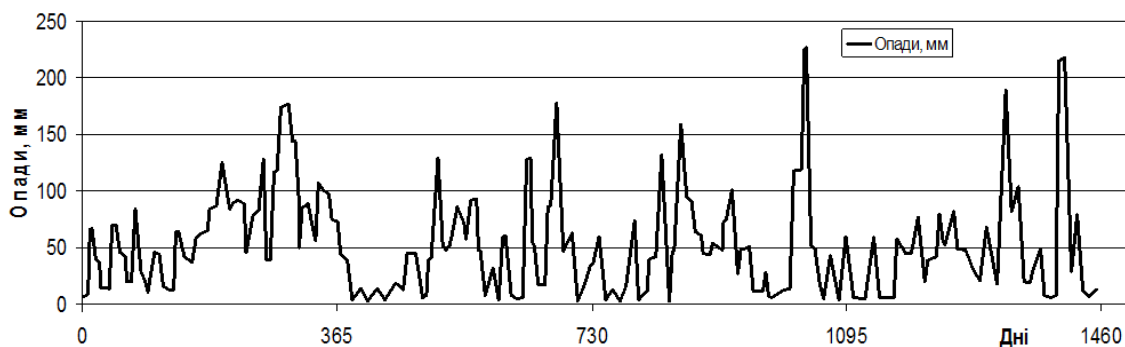


Рис. 2. Опади в долині Вайонт (середні за десятиденку) за 1960–1963 рр.

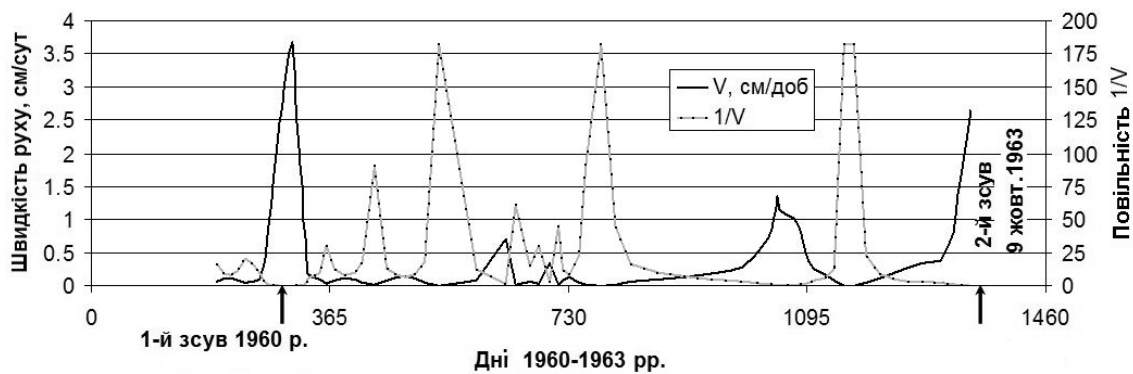


Рис. 3. Швидкості руху поверхні зсувного схилу та визначення моменту руйнування схилу борту долини Вайонт за допомогою зворотної швидкості (повільності)

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Після значних опадів у вигляді снігу взимку 2012 – 2013 рр. та їх швидкого танення у березні – квітні 2013 р. виникли умови для численних зсувів на схилах правого берега р. Дніпро від Вишгорода до Канева та в інших місцях України. У результаті, наприклад, у межах Києва, помічені значні зсуви на Звіринській (на території Ботсаду НАНУ), Лисій, Багриновій (с. Корчувате) горах, Китаївському городищі та інших крутосхилах. Помічено також багато зсувів меншого масштабу. Мабуть, один з найбільших зсувів 2013 р. стався на околиці м. Вишгород. Узимку 2012 – 2013 рр. на схилах накопичилася значна кількість снігових опадів. Ще більше снігу випало за перший весняний місяць 2013 р.

Постановка завдання. Спостереження проводилися на деяких зсувонебезпечних ділянках м. Києва, хоча, на жаль, тільки візуальні, за результатами зсувів, які сталися.

Основний матеріал і результати. Ми зареєстрували два зсуви на південному схилі гори, на вершині якої розташовано резервуар ГАЕС. Місце зсувів, що сталися у квітні 2013 р. поблизу (0,43 км) Вишгородської ГАЕС, показано на рис. 4. За наявними спостереженнями, зсувонебезпечними на ділянці Вишгорода та Нових Петрівців є всі крутосхили цієї ділянки. На жаль, попередні дані спостережень за станом схилу невідомі, тому моніторинг було проведено візуально та за доступними даними Інтернету.

Виміри просторово-висотних розмірів зсуву виконано вздовж перетину загальною довжиною 0,9 км, що прокладено на плані (рис. 4), та оброблено табличною програмою. Довжина зсуву становить приблизно 170 м, середня ширина – 40 м. Перепад висот складає $H=148-122=26$ м (рис. 5).



Рис. 4. Загальний вигляд узвишся з розташуванням споруд ГАЕС та зсувів

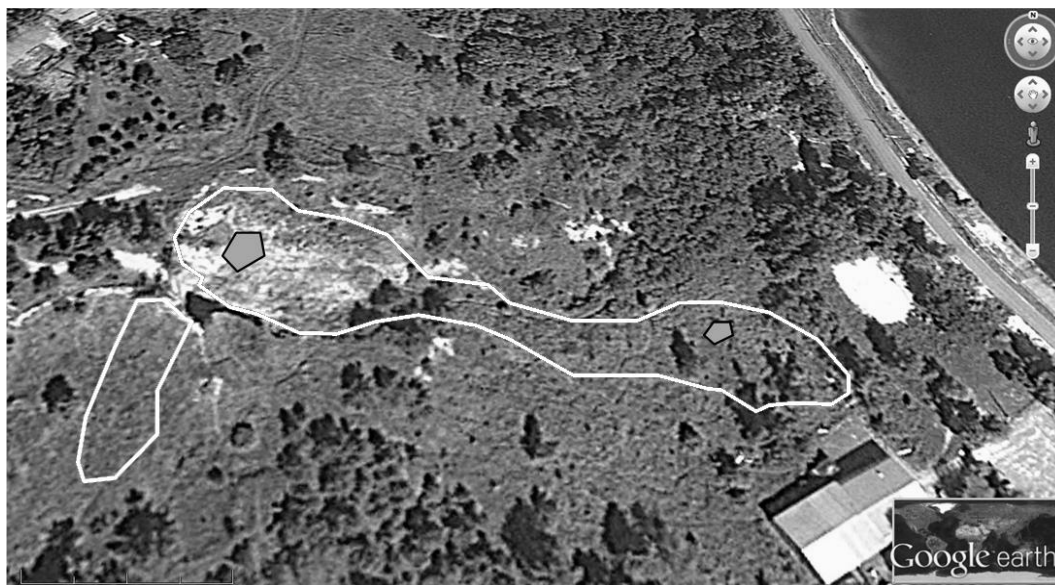


Рис. 5. Приблизні окреслення (білі лінії) бортів зсувів (показано озерця)

У результаті переміщення ґрунту під вершиною та на п'яті утворилися площадки із западинами, де в результаті ущільнення ґрунту виникли глиняні насичені водою озерця зі збереженим розрідженим станом ґрунтової маси, яка мала місце під час зсуву, вони збереглися до червня (табл. 1 та рис. 6).

Таблиця 1. Перетин уздовж зсувного цирку біля ГАЕС

Відстань від басейну ГАЕС	Відмітка поверхні до квітня 2013 р., м БС	Відмітка після зсуву на травень 2013 р., м БС	Примітки
0	169	169	басейн ГАЕС
142	165	165	
300	157	157	
416	148	148	край зсувного цирку у квітні 2013 р
432	148	136,9	край зсувного цирку до 2013 р.
451	142	134,5	
530	130	132	
555	126	130	
580	122	125,1	п'ята зсуву
650	104	104	набережна
700	102	102	НПГ водосховища
900	102	102	

Як видно на перерізі вздовж тіла зсуву (рис. 7), форми та матеріали зсувного тіла свідчать, що зсув 2013 р. має вторинний характер, тобто він утворився внаслідок замочування лесових матеріалів, що були накопичені у цирку зсувів за попередні 2011–2012 роки, їх просідання та сповзання. Виконані виміри й аналіз структури зсуву дозволили визначити обсяг зсувних мас 2013 р. у межах 8 тис. м³.

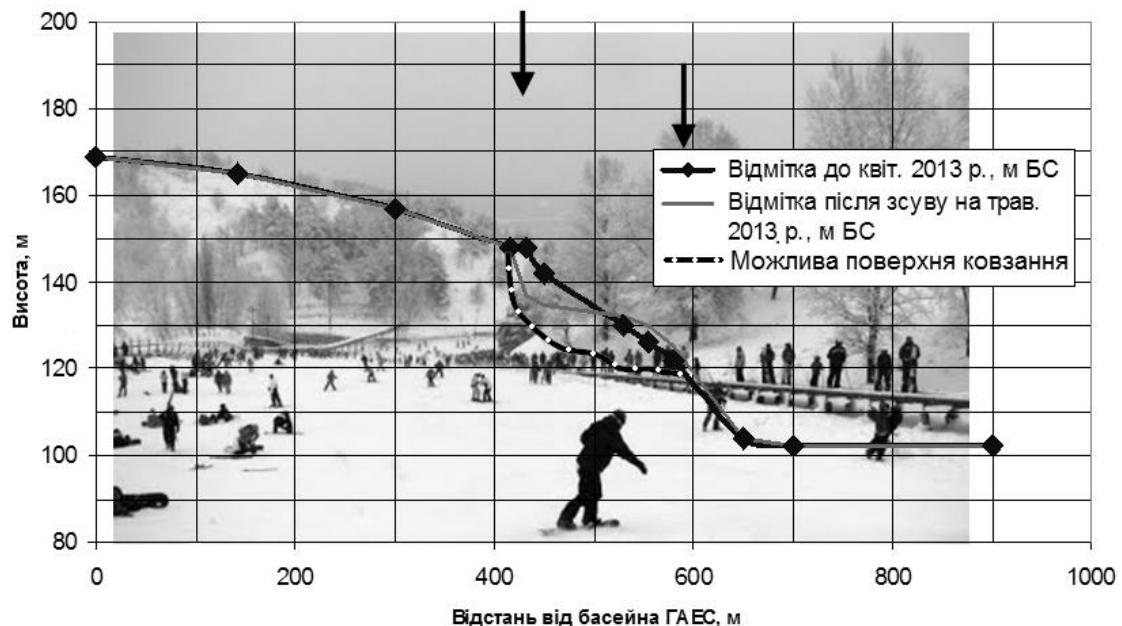


Рис. 6. Перетин уздовж зсуву на фоні зсувонебезпечних схилів узимку з боку Вишгородського гірськолижного комплексу (виміри поверхні перетину за даними GOOGLE Planet)



Рис. 7. Вигляд зсувного цирку з п'яти зсуву

Унаслідок проведення моніторингу та лабораторних досліджень зразків можуть бути отримані вихідні дані для чисельного моделювання прогностні розрахунки для визначення часу виникнення катастрофічного зсуву згідно з розробленою методикою [11].

Розрахунки проведені на чисельній сітковій моделі руху в'язкого ґрунту схилу та частини долини за умови прилипання до жорсткої плоскої основи [13].

Розглянемо для порівняння однорідний (незволочений) схил, який надано у сітковому вигляді на рис. 8 (відношення в'язкостей у шарах, які контактують $k_{inh} = \mu_0 / \mu = 1.0$). Первісний вигляд схилу показано пунктирними лініями недеформованої сітки. В'язкість неводонасиченого ґрунту визначено в розмірі $\mu_0 = 10^{16}$ Па·с, що відповідає максимальній швидкості руху поверхні схилу порядку 2–3 см/рік.

В разі накопичення вологи у шарі ґрунту над шарами з меншою водопроникністю, що завжди спостерігається з глибиною, його властивості змінюються [1], наприклад, зменшується коефіцієнт в'язкості ґрунту, і відповідно, збільшується рухливість (швидкість) та відбувається перерозподіл максимальної деформацій до зволоженого шару.

Порівняння характеру деформації та рухливості цього шару, згідно з рис. 9, в результаті зменшення в'язкості у шарі ґрунту, що розташований на водонепроникній основі, в розглянутому шарі відбувається значно більш

інтенсивне деформування у вигляді випирання. Напрямок течії ґрунту ілюструється векторами швидкості, які свідчать, що, наприклад, при зменшенні в'язкості вдвічі ($k_{inh}=0,5$), що відповідає збільшенню вологості на 10% [1, фіг. 7.2], збільшення швидкості руху спостерігається більше ніж удвічі (порівняйте рис. 8 та 9).

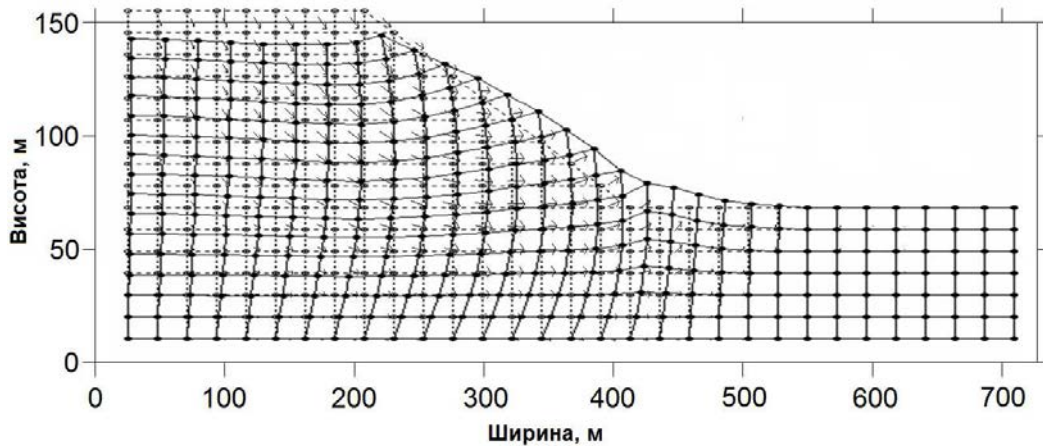


Рис. 8. Деформація однорідного схилу

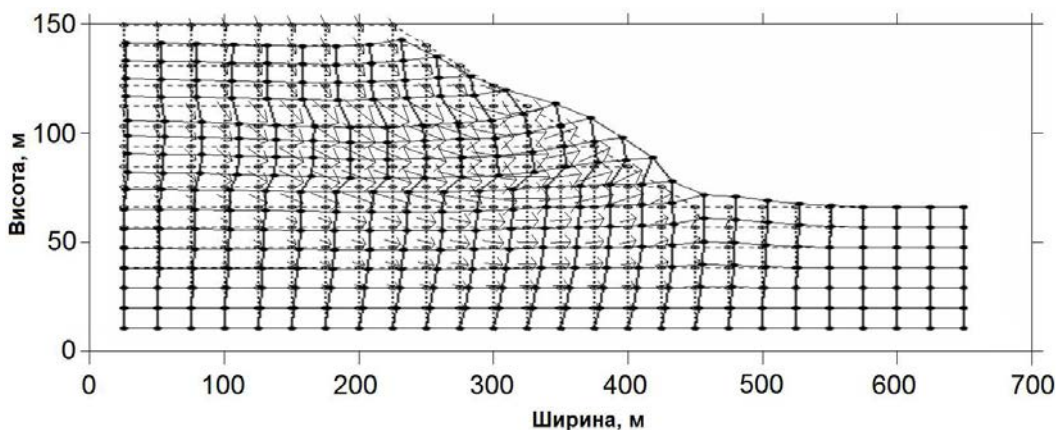


Рис. 9. Деформація неоднорідного схилу з насиченим водою шаром ґрунту над долиною схилу

Висновки. Унаслідок проведення моніторингу та лабораторних досліджень зразків можуть бути отримані вихідні дані для прогнозних розрахунків визначення часу виникнення катастрофічного зсуву згідно з описаною методикою. Підвищення деформованості водонасиченого (більш рухливого) шару ґрунту змінює механізм зсуву: призводить до витіснення розрідженої маси та просідання незайманих блоків, що відповідає механізму зсуву у водосховище Вайонт 1963 р. [10–12] та зсуву на схилі біля КГАЕС.

Література

1. Маслов, Н. Н. Условія устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве / Н.Н. Маслов. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 468 с.
2. Terzaghi, K. Mechanism of landslides / K. Terzaghi // Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume). – New York: Geol. Soc. Amer., 1950. – P. 83–123.

3. Sassa, K. *Mechanism of rapid and long traveling flow phenomena in granular soils* / K. Sassa // *Proc. International Symposium on Landslide Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage*. – Kyoto University, Kyoto, Japan, 2002. – P. 11–30.
4. Wang, F.W. *Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture* / F. W Wang; K. Sassa, G Wang // *Japan Follow Eng. Geology, Volume 63 (1)*. - Elsevier. - Jan 1, 2002.
5. Saito, M. *Forecasting the time of occurrence of a slope failure* / M. Saito // *Proc. of the Sixth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng.* – V.2. - Montreal. Toronto: University of Toronto Press, 1965. – P. 537–541.
6. Fukuzono, T. *Recent studies on time prediction of slope failure* / T. Fukuzono // *Landslide News*. – 1990. – № 4. – P. 9–12.
7. Voight, B. *A relation to describe rate-dependent material failure* / B. Voight // *Science*. – 1989. – 243. – P. 200–203.
8. Hungr, O. *Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity* / O. Hungr // *SOA Paper*. – 2007. – №4. – P. 30.
9. Kiersch, G.A. *Vaiont reservoir disaster* / G.A. Kiersch // *Civil Eng.* – 1964 – 34. – P. 32–39.
10. Hendron, A.J. *The Vaiont Slide* / A.J. Hendron, F.D. Patten // *US Corps of Engineers Technical Report GL-85-8*. – 1985.
11. Genevois, R. *The 1963 Vaiont Landslide* / R. Genevois, M. Ghirotti // *Giornale di Geologia Applicata*. – 2005. – № 1. – P. 41–52.
12. Crosta, G.B. *Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements* / G.B. Crosta, F. Agliardi // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2003. – №40 (1). - P. 176–191.
13. Островерх, Б.М. Чисельні дослідження напруженого стану та незворотних деформацій ґрунтових структур / Б.М. Островерх, Т.Л. Рева // *Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво). Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаментобудування. Вип. 75 : в 2-х кн.: Книга 2*. – К. : НДІБК, 2011. – С. 453–461.
14. Островерх, Б.М. Аналіз стану ґрунтових схилів та укосів за матеріалами картографічних та геоінформаційних досліджень / Б.М. Островерх, Л.С. Потапенко, О.А. Колодяжний // *Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво). Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаментобудування. Вип. 75: в 2-х кн.: Книга 2*. – К.: НДІБК, 2011. – С. 442–452.

Надійшла до редакції 23.09.2013

© Б.М. Островерх, О.А. Савицький, Л.С. Потапенко